# 要征服自然
# 必须服从自然

——培根

DU06/19

# 译 者 前 言

科学通史的中文译本，在我国已经出版了丹皮尔的《科学史》(商务印书馆)和梅森的《自然科学史》(上海人民出版社)。前几年，我们读到了两位荷兰科学史家用英文撰写的《科学技术史》，感到这本简要的通史是有特色的。后来，教学需要参考书，就组织力量翻译出来并油印成册。

现在得到求实出版社的支持，正式出版这部科学技术史，是因为：第一，这本书对于技术的发展花费了相当的笔墨，这是上述两本通史所不及的。第二，由于这本书没有阐述生物科学和医学的发展，所以对于天文学、物理学、化学等学科的叙述就比较详细，个别地方的阐述比有的专门学科史还要深入。第三，由于没有讲述现代科学（二十世纪以后）的发展，对于古代和中世纪科学的发展就有了较多的篇幅，其中对于中世纪科学技术发展的论述是我国读者了解较少的。第四，这本书的叙述简要而翔实。虽然全书几乎没有什么引文及转述，然而书中的论断大都有材料作依据。这是因为两位作者的功底较深，有许多论文和专著作为撰写通史的基础。他们在专门领域的工作受到国际科学史学界的尊重。因此，把这样一本通俗的富有特色的科学技术史著作介绍给我国读者是有益的。

翻译科学史著作是一件很费劲的工作，但又非常必要。著名科学史家李约瑟说："科学史是现代自然科学的成果之一。"由于种种原因，我国近现代科学技术处于相对落后的地位。很自然，近现代科学技术史的研究也就不够深入。但是，这方面的研究工作在国外却有相当长的历史了。科学史在二十世纪二十年代发展

成独立的学科，已经出版和正在出版发行的各种著作是很多的，其中有著名科学家的著作选本或全集，各个学科和各种专题的原始资料汇集，专题论著和会议文集，人物评传，专题史，学科史，断代史以及科学技术通史等等。据不完全统计，世界各国以各种文字出版的科学史期刊不下百余种，每年发表论文的数量也很多，其中有的是很有价值的。由于我国对世界科学技术史的研究还处于学科基本建设阶段，对这些成果的介绍还很不够，而介绍工作又是首先应该进行的工作之一。历史研究既不能为无米之炊，也不应重复别人已经做过的工作，这就是我们介绍《科学技术史》之初衷。

现在，新的科技革命向我国四个现代化事业提出了战略决策的种种问题，了解历史背景对于现状的分析会更加深刻。我们希望这本书对于关心科学技术发展与四化建设的所有读者都能够有所启迪。

《科学技术史》原书为袖珍本，分上、下两册，我们合译为一册出版。本书是在一九八一年译出的，此次出版前，我们又对全部译稿进行了认真的校订。但是，由于学识及能力的限制，错误及不妥之处仍然难免，我们诚恳地希望读者批评指正。

本书译者是：马俊峰（一、二章），张光（六、七章），高文武（十、十一、十二章），刘仲林（十四章），李本正（十五章），秦幼云（十七、十八、十九章），王勤民（二十一、二十二、二十三章），柯礼文（四、八、九、十六、二十、二十四、二十五、二十六章），刘珺珺（三、五、十三章、原书导言、跋及作者介绍）。柯礼文、刘珺珺对译稿进行了初校，刘珺珺又对全书进行了复校。

译　者

一九八四年十二月

# 作者介绍*

本书的两位作者都是荷兰的科学史教授，狄克斯特霍伊斯是莱顿大学教授，弗伯斯是阿姆斯特丹大学教授。

狄克斯特霍伊斯一八九二年生于荷兰的梯尔伯格，受数学和物理学的专业教育，在梯尔伯格高级学校任教多年。早年的考试迫使他学习了拉丁文和希腊文，由此引起他对自己专业的历史发生兴趣。多年以来，他发表了论述力学史、欧几里德、西蒙·斯台文（他大概是这方面的主要权威）和阿基米德的著作，其中论述阿基米德的最为著名。

弗伯斯一九〇〇年生于布莱达，受化学工程师教育。自一九二三年起一直在荷兰皇家壳牌石油集团的研究实验室和东印度炼油厂工作，成绩卓著。他爱好考古和博物收藏，以几种文字出版了冶金、石油、筑路、技术、食品、蒸馏以及炼金术等方面的历史著作和论文，他是研究人类开发自然财富历史的学者，在国际上享有盛誉。

---

* 此系原书的注。——译者

# 序　言

这本书的副标题："要征服自然，必须服从自然"，是从培根表达他关于科学方法和科学目的思想的许多箴言中选取的。

在现代，一个人只要不是闭目塞听，每天都能明显地感到这个看法的正确性：人类是能够战胜自然、控制自然和利用自然的；但是，要做到这一点，就必须服从自然规律，而服从自然规律又必须首先通过研究去学习这些规律。简而言之，技术必须以科学为基础，科学使技术成为可能。

现代人生长在现代社会中，现代社会以技术为其基本的构成要素，而技术的基础则是科学，所以他们容易把人类生活中科学和技术这两方面的密切关系，看成是不言而喻的，就象人们普遍承认科学与技术的存在一样。这种态度虽是可以理解的，但仍使我们感到不安。因为它造成一种盲目享受的气氛，使人们不能正确评价科学家和技术专家的工作；而他们为使社会达到并超过现有水平在智力上已经和正在做出巨大的努力。

要改变这种不应有的态度，唯一的补救办法就是研究历史。现代知识和技能是从非常原始的起点发展起来的，是许多人不懈协作，共同将前人的成就发扬光大的结果。只有了解了这些，才能充分评价现代科学技术，才能懂得以尊敬和感激的态度来利用它们。

从远古时代直到科学技术开始紧密合作的时期，西方文化在科学技术领域获得了大量财富，本书叙述这个过程的发展概况，旨在对上述问题的认识作绵薄的贡献。

我们面对的主题广泛而复杂，要在这样一本篇幅有限的小书

中加以说明，这个任务迫使我们不得不作高度的选择性处理。因此，我们只得仅限于论述无机物的科学而完全略去生物科学和医学。即使这样，在处理资料时也不能详尽无遗。所以，我们的目的只是对所涉及学科的历史发展描绘一个并非太不完整的轮廓，希望能由此引起读者对于科学通史的兴趣。任何指责作者不全面、不深刻的意见，我们都乐于接受。但是本书后面的详细书目为那些感到需要进一步详细研究的人们指明了途径。

无论现在科学与技术联系得如何紧密，但在历史上它们是沿着完全独立的途径发展的。有很长的一个时期，科学对其成果的实际应用漠不关心，技术又必须在没有科学帮助的情况下发展，而且正当技术能从这种帮助中得到好处的时候，却不止一次地嘲笑了科学。在十七世纪初，有少数人（如英国的弗兰西斯·培根，法国的勒奈、笛卡儿和荷兰的西蒙·斯台文）认识到科学和技术二者可能并应该合作，他们宣传这种看法，但这种思想直到十八世纪才开始付诸实践。这些事件的历史进程在本书的章目中得到了反映。本书是两位作者执笔，在材料方面有所分工，一人负责物理学、天文学及其数学和哲学基础各章，另一人负责技术和与技术有密切联系的化学各章。

作者只对自己所写的内容负责，狄克斯特霍伊斯是第二、三、六、七、九——十二、十四、十五、十七——十九、二十一——二十三章，弗伯斯是第一、四、五、八、十三、十六、二十、二十四——二十六章。

科学史作者面临的基本困难是，历史写作在接近现代时受到材料的限制。许多读者都希望科学发展史的作品在论述科学发展时一直延续到最近时期，都希望它是一种有历史基础的当代科学教科书。这个看法似乎很吸引人，但却是完全错误的。历史方法根本不同于系统方法。它首先要求能够对必须涉及的历史事件作公正的考察。考虑到现代科学的每一个分支可能有的浩瀚内容，要想按历史结构写作教科书或手册是行不通的。

这就是说，首先，一九六〇年以后发生的每件事情，也就是人们通称的现代科学，全部地被排除在本书内容之外了。科学与技术之间的紧密联系主要是在二十世纪才首次建立起来的，也就同样略而不谈了。

处理特定时期的不同学科，对读者的数学训练的要求差别很大，在写作本书时，作为一般原则，希望读者最好能达到大学生水平。而这无论如何是不可能的。叙述完满的科学技术史所给出的知识应该通过引证参考继续充实。由于篇幅的限制，由于适应没有受过专门历史训练的普通读者，作者感到有必要略去引证及脚注。如果能够参考后面书目中指出的著作，当然能够在那里找到足够的文献。

# 目　录


作者介绍

序言 ……（1）

第一章　起源……（1）

第二章　希腊科学——希腊哲学的一个方面……（17）

第三章　希腊科学……（28）

第四章　希腊和罗马的工程与技术……（46）

第五章　占星术和炼金术的兴起……（61）

第六章　早期中世纪的科学……（76）

第七章　晚期中世纪的科学……（88）

第八章　中世纪的技术和工程……（101）

第九章　天文学的革新……（117）

第十章　十七世纪的物理学（1）

伽利略时期……（132）

第十一章　十七世纪的物理学（2）

笛卡儿时期……（148）

第十二章　十七世纪的物理学（3）

惠更斯时期……（162）

第十三章　从炼金术到化学……（175）

第十四章　伊萨克·牛顿……（189）

第十五章　数学，科学的侍女……（205）

第十六章　技术知识出现于出版物……（215）

第十七章　牛顿以后的力学……（229）

**第十八章** 热学……（247）
**第十九章** 声学……（264）
**第二十章** 蒸汽机的成熟……（270）
**第二十一章** 光学的进一步发展……（286）
**第二十二章** 十七世纪的天文学以及其后至十九世纪中叶的天文学史……（301）
**第二十三章** 十八、十九世纪的电磁学……（320）
**第二十四章** 钢和电改变着世界……（338）
**第二十五章** 新化学……（355）
**第二十六章** 近代化学工业的兴起……（369）
**原书跋** ……（385）
**人名索引** ……（387）

# 第一章 起 源

推测科学始于何时何地是徒劳的。确实，史前洞穴里的绘画不仅正确真实地描绘出植物、动物和人的动作，并且也画出了诸如原始人观察到的星座位置这样一些自然现象。考古学家已经发现了可能是画着原始文字和数字的鹅卵石，但我们现在还不能读懂它们。从这些遗迹（其日期是地球上出现人类许多世纪后）中，我们只能推断在很早的时代，人类就已观察和记录某些自然现象了。他们是否想解释以及怎样解释这些现象，我们还不知道。人种学家对现代在地球上某些偏僻角落找到的原始民族进行研究，从中得到一些关于原始人思维活动的暗示，但我们还须警惕不要太相信这些证据，因为后来证明这些部落中有些不是原始的，而是退化了的部落。我们唯一确知的事就是，从这些对自然现象的观察中得出的结论形成原始人世界图景的重要组成部分。这些结论被包含在原始部落的占统治地位的宗教和哲学教条中，而不能象我们看待科学那样当作一个独立的思维领域。

## 早期科学

公元前四千年，在近东的美索不达米亚发明了文字，几个世纪后传播到埃及，这使我们较为肯定地掌握科学观察和科学资料在早期文明中所起的作



8610641

用。楔形文字书板和写着象形文字的纸莎草纸告诉我们早期科学家们所走的第一步。随着时代的推移，各种文本特别是数学和天文学方面的文本逐渐地多了起来。

为了理解这些科学家所做的工作，我们还须回想一下现代科学家是怎样工作的。科学家发现了问题（无论他的课题是阐述支配现象的一般规律，或是彻底弄清现象的真实情况），便搜集与此有关的知识和资料。然后提出一个作业假说，根据这个假说得出推论，并通过实验和试验加以检验。根据这些实验的结果，接受作业假说或者加以修改，甚至于完全推翻，而后其他科学家将巩固并运用这个论据。

就我们所知，前古典时代的科学家远未达到做实验这一步。前古典时代仅有几个罕见的实验例子。如一位埃及贵族以曾为国王制造了一口有刻度的“水钟”而自豪。这是一个状似截顶圆锥，靠近底部有一个小孔的容器。然后在里面刻上标记，观察者可以根据水平面的下降读出时间间隔。但是这个实验并未证明或支持某一个假说。

看来，发明文字的目的是为了保留早期美索不达米亚神庙的记载，以及登记交付仓库或分配用的粮食、羊和其他贡品。在早期，我们发现了一些好象按相关的物体分组排列的植物、动物、石头和星星的一览表。在埃及和美索不达米亚发现的这些“辞典”是对精心观察到的自然客体进行分类的最初尝试。它们是这样被分类的：记录它们的特点（真实的或想象的），然后把那些有某些共同特点因而看起来是以某种方式相联系的物体或生物划归为一组。

在某些古苏美尔(下美索不达米亚)文本中所使用的术语特别强调这种联系。一个“种”的所有成员都用一个通用的名词来表示，如“白”，“黑”，或“铁石”，“木”，“容器”等等，对这些词加上词尾和词头来表示“种”中个别成员的独特的特征，诸如颜色、硬度等等。这样得到的命名法类似现代有机化学

的命名法，例如将醇这种有机物分为甲醇、乙醇和戊醇。因此苏美尔人矿物表上的颜色、硬度等各种性质使我们几乎能区分出所提到的全部140种矿物。对自然界实体和现象所做的这种分类，可以认作是科学推理的最早尝试。实际上可把这种分类看作是真正科学的最初阶段。

但另一方面，对这些分类表格的价值也不应估计过高。尽管亚述国王阿苏贝尼尔图书馆的组成中这类表格不少于百分之八，但它们不仅对自然客体，而且对神灵、魔术、城镇、国家、河流、职业或官衔也进行了分类。看来它们曾在神庙学校中被文书们用于训练学生的书法，后来则被用来对亚述人和巴比伦人讲授苏美尔语（当时已是死语，但仍是他们宗教文献的“拉丁语”），或用于附有语言学脚注的双语辞典中。这些表格还是显示了当时人们对自然事物的观察是多么仔细和精确，显示了当时已经认识到的自然事物的性质以及文书们和工匠们的经验正在如何构造一个“自然体系”。

古代科学，如在最早的数字和天文学文献中发现的，是由祭司和文书们在神庙学校中教授的。神庙学校是当时唯一可供那些未成为职业祭司但在政府和军队中任职的人利用的学校。科学并不是古代科学本身的主题，它是由一系列使用于商业、手工业、工程、税务或预言天文现象、制定历法或宗教节日的计算规则和方法所构成。科学，如果我们可以这样称呼它的话，仅仅是宗教和哲学智慧的一个组成部分。它并没有构造一幅自己的、唯一建立在对自然现象的观察并满足某些假定的或确立的“自然规律”的世界图景。这种概念对前古典文明是完全生疏的。当时的感性世界仍是诸神在“创世之初”创造出来的世界的一个组成部分。

## 重量、测量和数字

古代的数学本来是一套供实际运用的方法和规则，希腊字“arithmein”“数数”和拉丁字“calculare”“计算”（来源于

calculus：小鹅卵石）表明算术初始时的日常用途。后来更加普遍的代数学是由此发展起来的。同样，希腊字“geometrein”（丈量土地）则表明了几何学是为了登记和征税的目的而被用来测定田地的面积的。古埃及和美索不达米亚的文本和浮雕常表示官员及其奴仆用测链进行工作。

在日常生活中运用数学已有历史记载证明的时候，尼罗河、幼发拉底河和底格里斯河及印度河谷的文明已经大大向前发展了。也许文字在埃及历史中的出现稍晚于美索不达米亚，但是在这两种情况，我们看到的都是农民占居民大多数的国家，由主要集中在城镇的政府统治着，政府对于商人和手工业者支持的贸易和工业拥有完全的统治权。当时，表示测量、数量和重量的标准已发展得相当完善，在大多数的国家都有几种表示重量的制度，一种用于笨重的商品，还有一种或几种用于金银的金衡制，因为当时的商业采取以物易物的形式，不同的价值以一定重量的金、银或铜来支付。

测量单位是从人身上取来的，虎口、手指、手掌、前臂和脚都用作为单位，其中最流行的是以前臂长度为基础的单位，通常叫艾耳或腕尺，四艾耳等于一英寻。这些标准同纺织工业和贸易的发展有密切联系，在许多世纪中一直依附于这种发展。

在许多情况下，我们不能再对这些度量制度追根溯源。在古代中国，测量和重量的标准好象是根据红黍米粒的大小和重量。在美索不达米亚和西方闪族语系世界，塔兰——米纳——谢克尔重量制（圣经中曾多次提到），可追溯到一粒大麦的重量。自然界对标准化的作用是如此有效，这个地区的度量制据说也是根据大麦粒的长度制定的。不论这一点能否被证实，下列事实却是无可置疑的：在古代近东早期的历史中，十分需要重量和度量的换算方法。因为每个地区和城市国家都想有自己的度量标准，尽管有时与邻国的标准几乎没有什么不同。贸易和政府积极地帮助创造一些简单的计算规则和方法，这些就是我们今天所说的算术。

数学发展中最重要的因素之一是对表示数字的符号的选择，拙笨的计算形式或缺乏清楚的符号都可能而且也的确阻碍了这门科学的发展。最古老的文字形式是基于用图画再现各种思想；最早的数字符号是划道和十的组合。后来逐渐地发明了一种新的方法表示更高的单位（例如我们十进位制中的百、千等等）。美索不达米亚的文书们挑选了六十作为这种单位，这可能是因为在他们的重量制中一米纳等于六十谢克尔。

然而最重要的不是选择了单位（60），而是引进了进位值制（象我们现在数字中用的那样）。一个数在数目中的位置使人一眼就能看出它表示个位、十位还是百位等。因此，巴比伦的文书写上“▽《𒌋”（我们通常译写为 1 ,23）来表示 1（×60）+ 23，或者是我们记数法中的83。采取六十进位制（以60为基础）和位值表示法决定了巴比伦数学的迅速成长。它对不同量级的单位或埃及人所引入的不同分数，就不需要用各种不同的符号来表示，这使得人们更易读懂数学书。

## 巴比伦的数学

我们关于美索不达米亚数学发展的知识还是支离破碎的。但我们知道，两河流域最早的居民——苏美尔人由于采用精心挑选的六十进位制的符号系统和位值系统，肯定使数学的发展超出了简单算术阶段。在初期，数学是作为各个城邦范围广泛的寺院管理的工具而发明的，用于征集和分配属于诸神财产的天然产品及制品。发明后不久，就在书院中讲授。那些早期数学教科书的残篇表明，人们都相信数学训练是必不可少的。

大部分的楔形数学泥板可以追溯到古巴比伦时代（公元前1800—1500年）和古希腊塞琉古时代（公元前300—0）。收集到的文本可分为两种。一种是“表格文本”，这是实际中直接应用的。这些字板包含一些便于把大单位换算成小单位以及把小单位换算成大单位的表格。乘法表在其中占有很大的部分。有些还包

含了平方表和立方表，可用以求出平方根和立方根，并解三次方程式。也有许多反数或倒数表，对于我们所谓的除法a÷b，是用$a\times\frac{1}{b}$的乘法实现的。在古美索不达米亚所用的六十进位制中，可以把许多这样的倒数表示为有限的六十进位的分数；因此除以十二可被分解为先乘以五然后再很容易地除以60，这些表格也许是用于神庙学校的教育工具，其中有许多包含了象我们现在小学里仍然在做的非真实的“算术题”，但它们也涉及编织、羊、粮食、贵金属和遗产的问题，因而也就涉及日常生活、商业和工程的问题。

第二种是所谓“问题文本”，大都带有纯粹代数性质，甚至在处理几何问题时亦如此。它们经常把两个未知数的乘积定义为“面积”，这表面上看来是几何形式，其实只是表示一次方程或二次方程（或那些可以化简为二次方程的方程式）的简化式。数字方法用来补充一般的代数步骤。他们所知道的几何问题都尽可能地用代数法解决。这些几何问题一定是用于数学练习的目的，因为一些泥板包含着四次、六次代数方程式和正多边形的面积公式或毕达哥拉斯的整数三个一组表达式，这些都是纯数学趣味的问题。亚述人和巴比伦人是否有真正的纯数学方面的意图，我们还缺乏证据。但在很早的时期，他们肯定已发展了应用数学方法，以约计和计算相当复杂的天文现象，如某些行星在不久的将来在天空中所处的位置，而这就使他们比任何别的近东文明更早地掌握了天文学。在公元前300年，他们就充分运用他们的数学进行这些天文学的计算。从那时起的许多世纪里，理论天文学是唯一用数学去理解和描述自然现象的领域。

## 埃及的数学

我们只有极少量埃及数学纸草的遗稿，其中除了莱因德纸草和莫斯科的纸草外，其余都是晚期的。

在尼罗河谷，数学的发展没有超出计算某些实际问题的早期阶段水平。他们选择了一个蠢笨的数字符号系统，其中十进位中的每一较高级单位都有它特殊的符号，它类似很不适合复杂运算的罗马数字。尽管埃及人在三角形、矩形和不规则四边形面积和体积的计算方面发明了比巴比伦人更好的公式，但是他们还是被他们国内所用的对面积和容积的多种计量方法所桎梏。数学问题的中心都围绕着建筑物与金字塔结构斜坡容积的计算和啤酒、面包等的数量分配上。这样的计算在日常生活中当然是需要的。虽然埃及人比美索不达米亚的居民有高超得多的工程技术，并用天然的石块建造了许多巨大的工程，但我们还必须记住他们的数学只用于解决次要的运输等问题，而不是运用于结构问题，至于静力学和材料强度科学，当然更不为他们所涉及。

埃及的算术被限制在“成倍”和“二等分”这样一些最简单的乘除方法上。比如说要以5乘12，埃及人就先写上 $1 \times 12 = 12$，然后“加倍” $2 \times 12 = 24$，再“加倍” $4 \times 12 = 48$，因为 $1 + 4 = 5$，所以 $5 \times 12$ 就是 $12 + 48 = 60$。除法被看作是一种乘法，但用相反的方法表达。也就是说，为了获得被除数，应用何数来乘除数！他们书写分数的方式使计算大为复杂。埃及人对1/2，2/3，3/4有特别的符号。在谷物计量中，他们对1/2，1/4，1/16，1/32，1/64又采用另一套符号。至于别的分数，他们只能写出以1为分子的分数。所以他们把1/5写为“5份”（第五份），但是对他们来说，2/5就是无稽之谈，因为只有一个“第五份”。因此他们又用特殊的表格，借以把2/5分解成“1/3＋1/15”。分数运算只能用特殊的技巧实现，它们还保留在希腊—罗马时代的纸草书和拉丁文的丈量论文中，并作为“埃及的计算方法”在古希腊加以讲授。

## 埃及的天文学

象在数学方面一样，埃及人对早期天文学贡献的重要性也被希腊人大大地夸大了。事实上，在希腊化时代（公元前300—0）

埃及人接触巴比伦天文学之前，他们的天文学从未超出初始阶段。

我们仅有两份以天文学的原始材料为基础的古埃及通俗纸草书，但有较多的材料系出于希腊化时代。而且是用古埃及通俗文字或科普特文① 写的。最古老的天文学文献是画在棺材盖上所谓的对角线日历（这可追溯到公元前2000—1600年的中王国时代）和后来新王国坟墓的顶盖上的星象图。

无论在埃及还是在美索不达米亚，在很早的时候，人们就观察天体，对星体命名，辨认星象方位并归于诸神或各种超自然的力量。在美索不达米亚，某些这样的方位系统被排列在误称为“黄道带”的表格上，它指出国家某些地区夜空特有的顺序。虽然这还不能构成天文学，但这样的观察在古代生活中有极大的重要性。因为人们相信，和宗教节日一样，政治、经济生活中的许多事件确实取决于某种天体现象和方位。

真正的天文学只是随着对诸如月亮盈亏现象的原始预言，即随着历法的采用而开始的。

早期的历法建立在对某些天文现象（诸如月亮的圆和缺）的重现的短期预言的基础之上。埃及和美索不达米亚都有阴历。埃及的阴历以早上下弦月的不可见为月初，美索不达米亚的阴历则是以傍晚时上弦月的再现为月初。经过多年的实际观察，人们发现“太阴历”的“月”包括29个或者有时是30个太阴日。但是早期的阴历还不能很成功地与亏月和满月的复杂交替相符。只是到了公元前300年，巴比伦人把数学用于许多观察到的数据，从而成功地确立了一个相当完善的太阴历周期。

除了太阴历，埃及人在早期还采用了一种为经济生活所需要的民用历法，这种历法一年十二个月，每月三十天，加上五个多

---

① Coptic，古埃及人后裔称科普特人（copt），科普特文是他们的文字，一般用于科普特教堂——译者

出来的闰日就形成了埃及的365天的民用年。这是个重要的发明。不久他们又发现一个太阳年是365天零六小时，我们现在也是每四年加一天，使得民用历的年和太阳年相符合。埃及人还有个农历，一年由三个季节组成，它们和尼罗河的涨水有关，洪水年和民用历的年一致。

当然，民用历法和宗教的太阴历的联系问题很早就在埃及出现了。这个问题由包括16个小年（每年12个太阴月）的25年周期解决了。这个周期作为计算埃及年中月亮现象的合适基础而为希腊天文学家所熟知。

在埃及的农历中，星辰也起着显著的作用。许多世纪的观察告诉人们，象天狼星这样一些重要的星座的偕日升起（星体在太阳附近最早可见时刻）可以与民用历联系起来。于是出现了一套历制，其中一个特殊的星座与民用月的上中下三旬相联系，因此，我们在早期的棺材和墓穴里发现了这样的“黄道十二宫的每十度”的表格。

埃及的祭司和“观时者”借助于简单的铅垂线和水钟观察到这些黄道十二宫的每十度（还有别的星座）的移动。公元前2500年，这些星座连续的升起导致了星钟的使用，把从黄昏到黎明这段时间分为“夜间十二小时”。埃及人对称性的概念又促使他们把这种方法转变为一天分成24小时，我们至今仍在沿用。在希腊化时代，巴比伦的天文学传到埃及，埃及的24小时一天就又细分为每小时60分钟，早期天文学家的不相等的小时（它随着不同季节里昼夜的长短而变化）就被长短相等的小时所代替。在白天，时间的推移也可借助于日晷大概地估计出来。

## 巴比伦的天文学

埃及的天文学从未超出制定可被合理地接受的历法系统和太阴—太阳年周期的阶段。巴比伦的天文学家超出了这一点，尽管他们并不比埃及人拥有更好的工具。他们原来也有依季节互相交

替而长短变化的“夜时”制，并把每天分为六部分，把地球上的距离换算到天空，用以表示天体间的距离。巴比伦人由此使用自己的长度标准，从而把圆周分为六等份。这种做法在我们今天的几何学和三角学中还留有痕迹。

由于把数学方法用于观察，巴比伦的天文学在预测方法上达到了相当精确的程度。此项应用无疑是开始于公元前500年，到公元前300年还在积极推行，这一点可以从大部分是公元前240—40年的几百块天文学字板中得到证实，这些字板显示出当时已达到相当高的理论水平。大约在公元前380年，巴比伦天文学家发现了阴历和阳历之间的实际联系，这就是每十九年为一周期，每一周期中十三个太阴月为一年的有七年和十二个月为一年的有十二年。公元前432年雅典的麦顿亦曾提出过此周期，此后人们称它为麦顿周期，这个周期后来由于在基督教历法中作为计算复活节日的工具而变得十分重要。

## 史前的技术

地球上的人类开始制造工具和物品（这些工具和物品都是随同人类遗迹一起被发现的）。以前，谈不上人类历史的开端。由此人类在很早的时候就表明自己是能制造工具的，“人是制造者”。生活本身迫使人必须解决诸如自己以及家庭的吃饭、取暖和防护等问题。许多民族的传说和神话都正确地强调了人类第一次征服自然——取火以供取暖、保护自己，并且扩大用作食物的天然产品的范围，其中有许多不经适当煮烧无法食用——的重要性。盗来天火的普罗米修斯，就是技术和技艺的先驱者。后来的大多数技艺和技术都导源于厨房用火及用火把自然物变为有用物品的可能性。

由此可见，人不仅发现了许多有用的动物、植物、石头或其他在自然界中可供使用的物质，而且还通过观察它们的性质和特性，将它们与可使用的自然力一起，以生产新的物品和商品（他

自己的发明），从而磨练了自己的智力。我们现在只能从考古学家发掘出来的遗物中寻找对这些发明和创造所作的尝试。由于世界不同地区的人类遗体及遗迹经受了各种各样气候条件的作用，所以我们仅看到延续了许多世纪的少数历史古迹中的极少量的遗物。又因为缺乏能表现史前人的思想、信仰、成就和理想的文字材料，所以我们对于史前人的认识是支离破碎的。

尽管如此，我们也不应因此而低估史前人的技术能力。我们知道，在旧石器时代，他们就开始把燧石一类的石块制成工具。他们凿去碎石片，留下有用的核心部分，从而制作了石斧等工具，使他们可以在茂密的树林中开出一块空地，这就是木匠技艺的起源。他们把燧石削制成有用的薄片，制造出刀、锯、凿等不同工具，用于对草原上的动物剪毛剥皮，也为狩猎提供有用的武器。我们不应低估这些工具的用途。现代专家们把各种史前工具的砍角和形状与现代工具相比较，发现它们在原理上没有什么不同，而且许多史前工具如使用熟练，会与现代工具一样既有效又经济。在新石器时代，人们学会了磨光较硬的如花岗岩这样的石头，进一步发展了有用石器工具形状，使之成为一整箱成套的工具。这种工具箱足以和上世纪近代机械出现之前的任何能工巧匠的工具箱相媲美。

从石器时代起，人类慢慢地学会把石头加工成器具和工具，后来又制成家庭用具，人类的技术逐步达到较高的效率。他们也加工骨头、象牙、木料，但这方面的技术限于切、削、砍、劈、锯，用石器工具对这些材料的加工操作一直比较简单，在整个史前时期没有重大的变化。

史前人不仅掌握和改进了饲养、狩猎和捕鱼技术，而且学会了制备食物：把食物放在容器中，借助预热的石块煮烧，后来使用手工制作的耐火陶器。烧烤、煎炸及其他烹调技术不久也被掌握了。由于火的使用，他们不仅能烘干谷物有效地磨碎它们，而且能用烤干和熏制的方法贮存食物，后来还用盐腌的办法。食物

贮存是一种重要的手段，它可以使人们免受变化无常的气候、不同的收成和不宜进行生产的寒冬影响。

适当的掩蔽所和衣服这种需要使他们学会了新的技艺。他们不仅住在洞穴和天然掩蔽处，而且开始建造木棚。由于掌握了编织技艺，他们就能先造一个篱笆架，然后糊上泥巴和粘土作为住处。他们在离内陆湖岸的不远处建造精致的打桩住所，以免受他人和动物侵袭。他们学会了使用植物纤维如亚麻和蓖麻，或者动物毛如羊毛，他们把纤维洗净，纺成线，织成衣服、席子、毯子。他们学会了把动物毛碾压成毡，用作帐蓬、鞋子和衣服，把兽皮做成皮制品。他们知道如何从几种植物中提取植物染料，并把矿物颜料和他们所用的脂肪掺和在一起，用于在洞穴墙壁上画出宗教的和神魔的图象。洞穴的照明采用简单的石灯，石灯内有一根灯芯，浸在脂肪和油中，放出火焰。

确实，在历史的黎明时期，他们已经在许多领域（如纺织、皮革等）掌握了主要的操作，这些技术在以后的历史只不过是把这些原始的手工操作加以机械化而已。

## 古典前期的技术

大约公元前3000年，在有成文的文献开始补充考古学家提供的证据之前不久，发生了一场社会变革，这就是戈登·查尔德所正确地命名的“都市革命”。地中海沿岸、欧洲、非洲和亚洲的部分地区逐渐地变成农业人口的定居区，狩猎和游牧部落退到了奥库曼的边缘。在这个从埃及一直伸展到波斯湾的富绕的新月形地区，在耶美和别的地方都发现过很早的农业村落，他们的经济以小麦、大麦、绵羊、山羊和牛为中心。在约里科有一个公元前6000年的有围墙的村落，当时甚至还不知道陶器。在史前的尼罗河、两河流域和印度河河谷形成了一些更大的定居单位，这就是我们所知的早期东方帝国。这些早期帝国的基础是农业，但以居住着手工业者、商人和统治阶级的城市为中心。各类技艺在庙宇和

政府所属的作坊中实施，在那里最好的材料作为贡物或实物租税被收集在一起，由属于这些机构的专门人员加工。如果说在许多情况下导致了某些协会或行会的出现，那我们决不要忘记许多手艺仍旧是在农民和市民自己家庭实现的。如果我们读到有关一些专家和技术工头在学校里受训练的情况，那么这通常也只与一些负责公共工程、政府视察和事物的官员有关，不能代表任何我们所知的技术教育。尽管如此，工匠和政府官员的花名册还是表明了在这些早期的城市已经有了一定的专业分工，象冶金术这样的技艺已成为专职工作，铁匠把他们的产品卖给市民和农民，以换得他所需的日常用品。

这些早期帝国处于考古学家所称谓的青铜器时代，当时冶金术已被采用。原始人在加工象金和铜这样的天然金属后（因为他们乐意使用任何这种“石头”），他们学会了用木炭在坩埚和熔炉中把矿石冶炼成铜。此后不久又炼出铜合金。这时铜合金还不是用两种或多种金属合金化的方法炼成的，而是把铜矿石或天然铜和含有其他金属如锡、锑、砷的矿石混在一起进行“精炼”，在熔化这样的混合物时，就产生了这个早期时代特有的金属——青铜。当锡矿石的供应用完时，早期的铁匠们就设法到更远处去寻找锡矿，这样就把冶金技术传到了中欧并达到大西洋沿岸。

这时采矿成为一门重要的技艺。史前人所用的加工燧石和别的有用石头的技术在西奈半岛、亚美尼亚山区、小亚细亚、巴尔干和中欧的矿井中不断趋于精巧和完善。金、银、铜和铜合金（在一些情况下还有陨铁）开始得到普遍的应用，但是用青铜代替所有的石制工具和器具仍太昂贵。在许多场合，石器工具比早期的金属制品效率更高一些。

石器时代简单的制陶技术，随着公元前4000年陶工旋盘的出现也发生了巨大的变化。陶工旋盘使人们能够制作出更加精致和新式样的陶器。正是因为陶工技艺的繁荣，使陶器成了区别各个地区文化的最重要的工具之一。陶器上釉的技术也被发现，从此

陶器被装饰起来而且不渗水了。在坩埚内制备釉料并烧成小条，加热时可把这些小条按砂芯模制，冷却后再把砂芯取出来，这样小玻璃物品也被制造出来了。在玻璃吹制法发明（约公元前50年）以前的许多世纪，已经制成香水瓶，软膏罐和带孔的小珠子。

在公元前3000年（也许稍后一点），雪橇上装上了轮子，同时轮子首次被用于二轮车和四轮车。然而有轮车在运输中只起了很小的作用，因为那时除了奢侈品，一般商品都不作长途运输，而驮畜倒是更受欢迎。象木材这样沉重的物品，都宁愿用最短途径运送到内河或海岸，再用编织物或成捆芦苇制成的船或由独木舟发展而来的木结构船只运走。为了把装备沉重的武士运往战场，车子在军队中起了一定的作用。但是一直到公元前2000年近东才出现马，并用马拉轻战车，只有在这时战车才改变了战斗的面貌，它起到了“古代坦克”的作用。

最大的变化发生在农业和与之相关的技术中。原始的锹或掘棍仅仅只能抓破一点地皮，因而收成十分可怜。青铜器时代的人开始使用犁，由牛或人牵拉，在江河流域人们还进行灌溉。这样就有足以维持较多人口生活的收获物，还可用以换取山里人的矿石、珍贵的石料和木料。象埃及和美索不达米亚实施的那种大规模灌溉需要许多人联合建造、维护渠道和运河，这促进了邻近地区居民点间的合作并加速了较大的政治单位的形成。这些政治单位基本上是“水利省”。对河水涨落的观察加速了“洪水历”的采用和对星座的偕日升起以及别的天象的观察。水灾后需要重新登记和测量田地，确立田界，以便向农业人口征税，以实物供应城市。建筑堤坝和运河，动土量浩大，对此必须加以计算以便投入劳动力。因此，得益于经验的建筑技术就产生了。另外，除原来只靠河水自然泛滥浇灌的土地，还增加了用皮袋、皮桶或转杆提水的人工浇灌，后来在希腊化时期用人或牲畜带动的更精致的机械提水浇灌田地。

青铜时代的农业由较原始的谷类如埃米尔麦转变为较好的谷类如小麦和大麦，这时的农业也扩大到在菜园和果园里栽培的蔬菜和果树的范围。含油植物如橄榄树这时也被广泛地种植。蜜蜂不仅仅用于生产古代人唯一可食用的糖（除了某些枣椰子糖浆），而且也用来制蜡，这是蜡画的一种重要原料。预先烘烤过的谷物在谷物砥石上被磨成粉末。直到公元2000年才把转动运用于磨石，并出现了简单的手推磨，虽然这时谷物砥石在古希腊还十分流行。人们也懂得了发酵技术，把大麦（有时也杂着埃米尔麦）酿成啤酒，它是美索不达米亚和埃及的普遍饮料，而埃及也正因为它所生产的葡萄酒而出名。在这两个国家，做醋的技术也是一项普遍知识。肉只有富人才吃得到——肉被熏制或晒干后存放起来——但是鱼却是较为普遍的食物。腌制技术被熟练掌握后，鱼就被运到很远的内地。在宗教要求保存尸体的古埃及，腌制技术促进了把人和动物的尸体制成木乃伊。

一般说来，从厨房中发展起来的技术，对化工技术是十分重要的。古代技术中的许多术语，使我们明白原始操作或器具都来自厨房。

这个时期在建筑方面也产生了新的技术。出现了利用太阳晒干的和烧制的砖。特别是在美索不达米亚那里，天然渗出的沥青可被用来生产供砖墙和地板用的优质泥浆。在开矿技术较为著名的埃及，开采天然石料用于砖块结构的建筑中。到了公元前2750年，佐西尔国王的大臣英霍泰普帕企图完全用砖形石料进行建造，这种建筑不用泥浆，只要垒起来就成。后来他又学会了直接把石料加工成适于建筑的形状，因此创立了利用天然石的建筑学。几代以后，这种建筑学就在著名的基泽金字塔① 建筑中达到了顶点。在美索不达米亚研究成功了第一个拱形建筑，亚述的工程师们学会了在河上架桥。城市的街道也经常铺砌路面。整个

---

①即著名的胡夫大金字塔，建于基泽地方。——译者

近东和印度河谷，都熟练地掌握了建筑专用下水道系统的技术。

我们很难在这几行文字中对古代工匠的创造性和多种多样的才能作出公正的评价，他们在没有同时代的科学家的帮助下独立工作，然而却奠定了现代技术的基础。但我们现在必须转到希腊科学的诞生。正是希腊科学吸取了近东古老的成就，并把它们传到我们的时代。

# 第二章

# 希腊科学——

## 希腊哲学的一个方面

### 米利都的泰勒斯

古希腊哲学著作摘编中记载，泰勒斯（约公元前640—546）断言所有的事物起源于水，据此，希腊自然科学史起源于泰勒斯的说法就延续下来了。

如果现代读者把这种历史学见解看作是一种无稽之谈，那是不足为怪的。现代读者自然想寻找这个命题的准确内容和它的依据，但是对两个问题中的任何一个，他都得不到满意的回答。

泰勒斯的意思可能是一切物质的东西都发源于水，由水组成，消失时又复归于水。所以，一切变化着的现象背后的不变的特征是水。但是这个含糊不清的主张没有用准确的术语（这是人们非常希望的）加以阐述，也未对其依据给出任何说明。人们做了许多努力企图弥补这个缺陷，但是，最多不过是一些貌似有理的推测；由于缺乏任何文字的证据，也不见得能有其他结果。那么，我们仍然把这看作是现代科学的起源，是人类智慧的伟大创造吗？

有三条理由（一条是反面的，两条是正面的）可以对此作出肯定的答复。

（1）解释自然现象的早期尝试中，神话因素起着非常重要的作用，而泰勒斯的命题中没有这类

痕迹，也没有创造自然事件、其行为不需作因果性解释的神、精灵或仙女的问题。

（2）姑且不谈泰勒斯命题所依据的经验（是水有好几种不同的存在形式呢？还是动植物的生存都离不开水？）是什么？我们注意到，他用这个假说解释了其他自然现象。他说地球象一个扁平圆盘在海水中飘动，这样，他就回答了大地靠什么支持这个古老的问题。

（3）现代科学正是从泰勒斯和同时代具有相同特征的人的思想持续不断地传下来的。我们完全有理由认为科学史应该从他开始，正如写一个人的传记应该从他的孩提时期开始一样。

## 希腊自然科学家

上节提到与泰勒斯同时代的一些人。希腊哲学史把他们和泰勒斯都划为爱奥尼亚的自然哲学家，而在古代他们又被称为爱奥尼亚的自然科学家，两者含义是相同的。这些人名单如下：

阿那克西曼德（公元前610/ 9 —546/ 5），他假设万物的本原是无限，一种不确定的但可被进一步确定的东西。

阿那克西米尼（公元前585—528），认为任何事物都是通过凝聚和稀疏作用从空气中变化来的。

赫拉克里特（公元前540—约475），除了变化本身，他不承认表现自然本质的变化着的现象中有任何东西是保持原样的，因此带着希腊思想所特有的青春活力，他从我们经验中最易变动的东西——火中寻求事物的真正本质。

现代的读者想到他所学的科学课程该生气了。他们要问：你打算给我们讲科学史还是哲学史？奥古斯特·孔德(1798—1857)认为人类思想发展的第一阶段是神学和神话，第二阶段是形而上学，按此种看法，爱奥尼亚自然科学家的思想可能处于比神话阶段更高的水平，但是显然还停留在形而上学的阶段。

答案是显而易见的，理由很简单，当时还没有任何和哲学并

列的独立的科学。所以，这时还没有科学史。然而，哲学涉及我们今天认为是纯科学的问题。因此，在科学史上还不能忽略这些哲学问题。

在希腊思想发展的过程中，一些问题或多或少地从哲学中分离出来了，关于这些我们将留在下一章去讲。这里我们暂且只涉及那些对科学的发展有过重要影响的种种哲学流派。我们仅仅是从这个观点来叙述，因此我们的讨论丝毫也不敢妄称是对希腊哲学的介绍。

## 希腊的哲学流派

我们将讨论七种哲学流派：

（1）**毕达哥拉斯主义** 毕达哥拉斯主义以具有某些传奇色彩的哲学家，萨摩斯的毕达哥拉斯（约公元前570—497/6）的名字命名。就我们的目的而言，这个学说最重要的（从绝对的意义上说也是最典型的）特征，就是它对于数最感兴趣，最欣赏数，把数作为一个形而上学原则。传说是毕达哥拉斯发现了这个事实：2:1，3:2，4:3这种小的数字比率分别跟最和谐的音程即八度音、五度音和四度音一致。这种比率的最大两项有时被归结为最低音（在这种情况下，显然是观察了弦或管的长度的比例），有时被归结为最高音（这又使人想起有点象振动频率）。不管这个发现是推动了毕达哥拉斯派对数字更深入的思考还是仅仅加强了他们当时已表明的倾向，但事实是他们在任何地方都观察到数和数的比例。

“任何地方”是从绝对字义上讲的。在天文学中，设想数字之比存在于世界中心到各天体的距离之间，由于这些比率也指音乐的音程，所以认为音程也存在于天体中。由此又引出了关于天体和谐的更广泛的思辨学说，这种学说多年以来一再迷惑有着神秘思想倾向的人们。

不幸的是，这种蛊惑产生于偶然的误解：和谐被理解为是两

个或两个以上的音调共同发声的结果，而根据希腊人的概念，它是两个相继音调的音程。

但是，确实到处都隐匿着数字：在几何图形中（1是点，2是直线，3是平面，4是空间），在道德品质中，（4是正义，7是良机），在社会风俗中（3是婚姻）。

亚里士多德（公元前384—322）对毕达哥拉斯派的思想方法提出两个简洁的公式：事物是数，整个太空是数与和谐。

在以后的发展中，毕达哥拉斯主义一方面导向对数的任意的无结果的推测，另一方面则致力于极有成效地发现任何地方都可用数字公式表达自然规律，最后当这种努力获得多次成功时，就认识到科学应该把数学借为表达思想的语言。

在天文学领域毕达哥拉斯主义有着特殊的意义，是因为两个原因。

（a）很可能提出了一种观点：太阳在天空中的运动可用两种复合运动的结果来解释：一种是相对于恒星沿着天球大圆的周年运动，这个圆周叫做通过黄道带星座中心的圆周（后来叫偏斜圆周，最后叫黄道）；另一种是和恒星一起绕天球轴的周日转动。

（b）无视表面看来无可怀疑的感官证据，首次产生认为地球可能不是不动的宇宙中心天体的思想。这种思想由费劳拉斯（公元前五世纪中叶）进一步发挥，构造成一个宇宙体系。在这个体系中，设想地球作为十个天体之一围绕着中心火转动（另外九个天体是对地星、月亮、太阳、五个行星和恒星天体）。

要把毕达哥拉斯派的成员彼此区分开来，确定他们各自生活的时间和地点以及每个人的贡献，是浪费时间。把毕达哥拉斯主义者联系起来的是一种思想模式，而不是一个学派或宗派。这种体系在不同的地点和时间都可以出现，例如象纪元初期所谓的新毕达哥拉斯主义。

（2）**爱利亚学说**　这是一个以低地意大利的城市爱利亚命

名的哲学流派。这一派的创始人巴门尼德约于公元前500年出生在这里。这个学派最突出的特点是坚决否认现实的任何变化，变化被认作是非真实的表面现象，因此——按希腊思想前后一贯的典型特点——变化被排斥在科学意义的领域之外。

爱利亚学派只承认不变的“存在”，这个“存在”是均匀连贯的和不可分解的。巴门尼德把它比作一个均匀的实心圆球。一个重要结论是，真空是不可能的。它是非存在因而也就不存在。对于运动的个别事例，爱利亚的芝诺(约公元前490—430)用难解的悖论来反对，以保护爱利亚学派的原则。因此芝诺是第一个论证设想连续性困难的人。

（3）**原子论**　称为原子论的哲学学说由留基伯(公元前六世纪）和德谟克利特(约公元前460—370)所创立，因为它承认变化是现实的，可把它看作是爱利亚学说的反动。他们假设存在着无限多的自身不变的微粒——原子，代替了爱利亚学派的实心球体。为了提供运动的可能性，这个学派认为，爱利亚学派的非存在也存在着，这就是虚空，正是在虚空中原子才可能改变自己的位置。

由于原子的秩序、位置、大小、形状和运动状态的不同，造成各种事物和势态，它们共同组成自然界。原子自身的内部没有变化，除了不可渗透性外也无别的特性。

因为人的灵魂（生命的本源）也是原子（一种特殊的、细小、圆滑的原子）所构成，所以一切意识的知觉的内容都仅仅是主观的外貌（因此是不重要的）。原子论导致了绝对的无神论，即对生命和宇宙的唯物主义的观点。这个学说最初能被流传主要也应归功于这个观点。哲学家伊壁鸠鲁（公元前341—270）把这种观点作为他反宗教的思想体系的科学基础。敬佩伊壁鸠鲁的罗马诗人提图斯·卢克莱修·卡卢斯（公元前95—55）则把这个观点变成经典的模型，多少世纪以来一直保留在他为保卫伊壁鸠鲁主义而作的说教诗《物性论》中。

（4）**柏拉图主义**　在雅典哲学家柏拉图(公元前429—347)

的哲学中，全部现实只是符合于形式或理念的超感世界的，可感世界的事物都不过是理念的模糊反映或粗糙的仿造。在这两个世界中间，数学占据了一个难以描述的中间地位。数学推论和经验的客体，甚至和画出的图形都没关系，而只是和想象的空间形式与数字有关，因此数学训练构成了步入哲学的真正准备。

与此相适应，真正的天文学也不涉及可见天体的可感知的运动，而与想象中的天空(它代替了感知的天空)中数学点的完美的运动有关，这些点只能描出均匀的圆圈。天文学家的工作，就是解释作为各种各样的复合均匀圆周运动的结果的天体运动所显示的不规则性（太阳和月亮运动的不均匀性，行星运动轨道的曲线）。为此而采用的技术术语是：保全现象。天文学家用这种方式从事的工作被称为柏拉图传统或柏拉图问题。

由于柏拉图主义对于经验主义一贯评价极低，因而产生了一种不能导致科学繁荣的倾向。另一方面，它把感官得来的基本上是不精确的经验和代替它的科学思想的概念图象相区别，提出了任何时代的科学都具有的一种特征。在对数学处理的努力中，柏拉图主义表现了和毕达哥拉斯学说的密切联系。因此我们将经常提到“毕达哥拉斯派的柏拉图主义”。

（5）**亚里士多德主义** 爱利亚学派否认任何变化的真实性，柏拉图与之相反只承认观念运动是真实的，亚里士多德则要求承认经验世界中的一切过程的真实性。他以现实存在和潜在存在的区别和相应的形式和内容这两个概念作为学说的基础。这两方面和他的全部形而上学体系紧密相关，在此必须详加叙述。我们的论述准备再次局限于物理学方面，将亚里士多德主义归纳为如下的特征：

(a) 这种学说认为，所有地球上的物质都是由四种基本物质或元素即土、水、空气和火组成的。不要把这些物质理解为这些名称所表示的经验物质，而应理解为只能想象的观念成份。其中每种元素都代表四种基本特性中两种特性的组合：干和冷，湿

和冷、湿和热、干和热。各种元素可以通过基本特性转化为它的对立面。因此在液体冻结时水变成土，而在液体蒸发时水就变成空气。虽然用混合这个词表示元素共存于复合物质中的方式，但这种方式已进入化学化合的概念。把“混合”用于描述变化了的、联合起来的组分混合为一，给古代和中世纪的注释家造成了许多有争论的问题，例如化合物中的各种元素是否继续存在？如果是这样，又是如何存在的？他们还关心这样的问题，物体是不是无限可分的？分割后是否还保持它们的特性？存在着较低分割极限的概念已被认识到，如果不是被亚里士多德认识到，也一定是被古代的和中世纪的注释家在他们关于自然界中最小量的理论中认识到。这些最小量和德谟克里特的原子有一定的区别。和原子不同，它们是可变的，而且它们具有特性——由它们组成的宏观物质具有的那些特性。

(b) 地球上的物体的运动区分为自然运动和强迫运动，第一类是由组成这些物体的物质本性引起的（符合行为由存在引起的原则）。而第二类只能暂时地由外部所强加。

自身性质决定一些物体下落（即向地球中心运动），称为重物体；相反地，一些轻物体由其性质决定上升(即向月球运动)。一个物体的自然运动依赖于该运动发生时所处的周围介质：木头在空气中是重物，但是在水中是轻物。

(c) 天地有别。与地球上物体的上升和下降的自然运动（它们只是暂时的）不同，还有天体的永恒的均匀的圆周运动。因此，根据行为由存在引起的原则，它们不是由地球上的四种元素，而是由第五种元素（第五本质或以太）构成，均匀的圆周运动是它的性质所固有的，并且和别的四种元素不同，它的内部是不变的。这导致了两个结论：（1）世界结构本质上是以地球为中心，沉重的地球由于它特别的性质，正好静止地处于世界的中心。如果说它曾在什么时候不在这位置，那么很久以前，在自然界的有限运动中它已经达到这个位置了。（2）把地球上科学的

概念和推理运用到天体，这在逻辑上是不可能的。特别是把地球本身也看作是个天体，这是荒谬的思想。

（d）空虚的空间（真空）是不可能的。对此提出了各种各样的论据，部分地联系到升落自然运动的理论，部分地联系到位置理论。我们不准备深入探讨这个问题，只是提一下，真空被看作是一个逻辑矛盾：没有任何东西占位的位置。

（e）承认“任何运动物体都是由和它相联的外界物体所推动”这个定理是地球上无生命物体运动理论的基础，由此得出结论：（1）一个脱离了所有外部影响的物体处于静止状态，这可以叫做古代的惯性定律；（2）至于每种强迫运动，必须寻找关于相关运动的问题，即与物体有关的运动原因。在一个相当复杂的理论中，例如在重物上抛或平抛的特殊场合，要考虑周围空气的作用。这构成反对真空存在的另一个论证：在真空中抛物运动是不可能的。

（f）所谓逍遥派* 的动力学的基本规律，和上面谈到的有联系。这一规律指出，由外因（力）推动的物体运动的速度和推动力F成正比，和反对运动的阻力R成反比；这个阻力似乎包括惯性、摩擦力和空气阻力。充分考虑到时代的差别，也为了方便起见，我们用下列公式表达这个定律：$V=C\frac{F}{R}$，基本条件是$F>R$，否则不可能运动。如果写成如下形式：

$$F=C_1RV$$

这就形成了和牛顿力学的基本定律$F=ma$相似的古代定律。对升落运动的见解也可用和上面公式相同的条件概括为如下公式：

$$V=C\frac{G}{R}$$

这里G代表物体的重量（在某些情况下可以是轻度），R代表介

---

*亚里士多德哲学也叫逍遥派哲学，因为亚里士多德在吕克昂学园里踱步讲学，故有此称。——原注

质的阻力。必须强调的是，用这些符合我们思维习惯的词和符号来表达的公式，是以一种实际上不能允许的方式规定和强调了希腊概念。由于这个原因，从这些公式中引出的结论并不是每一个都能当作是亚里士多德的主张。

我们之所以用比对任何别的流派都详细得多的态度来叙述亚里士多德体系的科学部分，是因为没有任何一个希腊哲学流派象亚里士多德派这样长期有力地影响了科学的实践。即使在中世纪，实际上也没有限制住它对欧洲思想的影响。对天文学和物理学的影响一直到十七世纪仍可感觉出来。而对化学的影响则延续到十八世纪。这种看法表明科学史家们对亚里士多德派的思想的高度重视是正当的。

亚里士多德学说内在价值问题只具有次要的意义。现代科学家都倾向于认为这种价值是很小的。他们抛弃了亚里士多德的许多论断，因为那是错误的或甚至是愚蠢的。他们接着注意到那些根据表面观察提出不成熟理论和从不充足的证据中得出具有普遍重要意义推论的习惯。

这个批评也许客观上是正确的，然而却缺乏深度。我们绝不能忽视这个事实。即在所有的希腊思想家中，亚里士多德对待自然具有最坦率的经验态度。对于科学创造来说，它被证明是必不可少的。绝不应忘记科学也是经验的。在科学中，必须实践的方法只有通过经验才能逐步学到。亚里士多德（以及一般的希腊思想家）最大的功绩，就是他把自然作为科学研究的对象。这一点比他经常独辟蹊径（后来这些道路把他引入迷途）重要得多。科学史令人信服地证明，任何理论总比没有理论要好些。从长远来看，所犯的任何错误，由于它和经验的不相容，都迫使人们对它们加以校正，但是如果没有了解自然的尝试，就不可能有进步。

（6）**斯多噶主义**　因为斯多噶哲学的实质主要是道德伦理方面的，所以它包含的科学内容和重要性就次于上述各体系。然而它的（精炼的）唯物主义却含有对科学问题的兴趣和欣赏。同

时，它的关于世界是由一个合理合法的原则支配的有秩序宇宙的基本信念，也创造了有利于科学的环境。

（7）**新柏拉图主义** 这是柏拉图哲学的后期形式（公元三世纪），如它的名称所表示的。它把自己看作是柏拉图教义的复兴，它也致力于综合柏拉图学说和亚里士多德学说，因此，它对于在后世保持和传播这两个学说所产生的重大影响，起了一定的作用。

新柏拉图主义的特点是立足于精神而蔑视所有物质的东西，因而对自然过程毫不关心。柏拉图主义所包含的反经验态度被它们进一步强调了，所以不能期望这个新的哲学倾向有助于科学的繁荣。

以上对希腊哲学科学方面的简短概述足以使读者确信，希腊哲学是科学史上一个重要因素。它的影响可以是有益的或有害的。但无论如何，它与早期科学的关系十分密切。希腊思想家开创了科学的实践，他们给自然科学引进的一些思想方式、概念、术语方法从来没有消失，而且其影响一直渗透到现代科学中。

现在我们用几点最贴切的概括（希腊人以此决定科学的进一步发展）来结束这一章。

最初认识数学对科学具有根本的重要意义的是毕达哥拉斯派的柏拉图主义。科学的真正任务在于创造一个数学体系，其推论和观察一致，而且能从中引出可以接受经验证明的预言。这种观点归根到底是从研究现象的希腊概念中提出来的。

爱利亚学说，确信真实的存在是不变的，这就是人们竭力在自然现象和理论（这种理论把因果依存归结为同一）中发现不变性思想的根源。自然现象中的不变性后来就导致了守恒原理的表述。

表面感觉是连续体的微粒结构的思想（这对科学是十分重要的）则见于德谟克利特的原子论。全部有关物质动力学的理论也源于此。这种理论支持用公式表示守恒原则，这反映了它和爱利

亚学派的内在联系。这是能量原理的最早的来源。

把经验资料作为科学研究的真正目的，这种认识起源于亚里士多德学说，结果形成了对于自然界的彻底经验主义态度。发现一般规律特别是关于运动的一般规律，寻找规律的起因的种种努力，以及把观察到的物质多样性归结为由有限量的基本物质组成的复合物的思想，都源发于这里。

把整个世界当作一个伟大的有条理的统一体，这个统一体从属于一个无所不包的、为理性所理解的规律体系，这种观念是斯多噶派最先提出来的。

本章概述了希腊思想中促进科学的一些基本因素，我们将在下章论述希腊科学的各个方面。

# 第三章

# 希腊科学

## 数学

这一章将简要论述古代希腊自然科学中不再被看作是哲学的组成部分、而在某种程度上独立出来的那些方面。我们在第一章中虽然已经说明，不再把数学看成自然科学的一个分支，但是数学和自然科学关系密切，而且是自然科学发展的重要基础。首先论述数学史是有好处的。

在数学史上，希腊数学家从巴比仑和埃及文明究竟接受了多少知识，是一个吸引人的问题，但是，本书不需要深入讨论这个问题。希腊人处理数学的方法，即在定义和公理基础上的抽象逻辑体系，是希腊精神对于数学发展的完全独创的贡献，这是无可争议的事实。在柏拉图主义影响下，数和从前产生它的实际需要之间的联系完全割断了。如果说，数学在古代自然科学中已经具有重大意义，这要归功于把自然科学当作数学一个分支去研究的努力，而不是任何直接的实际应用。这种努力在某些学科中实际上是成功的。

根据本书的要求，我们只叙述少数几个伟大的希腊数学家。经过漫长的岁月，约在公元前300年，欧几里德提出了对数学作系统阐述的权威性形式，许多世纪以来，这种形式被公认为是数学方法的典

范。公元前三世纪，叙拉古的阿基米德（约公元前287—212）发展了计算面积和体积的精确方法，并为这种方法于十七世纪扩充发展为积分学作了最初的准备。我们即将谈到阿基米德从数学角度处理物理问题的方法。稍后，帕尔格的阿波罗尼乌斯(约公元前262—170）提出圆锥曲线理论，这个理论所达到的水平一直到十七世纪还没有人超过。他认真负责地把某些数学方法引入天文学，由此后来产生了《球面学》，也就是球面几何学与球面三角学。希腊的数学天才们还创造了许多其它成果，这些成果对自然科学的发展没有直接影响，就略而不谈了。

现在按照所取得成果的科学意义将希腊自然科学分成学科来加以考察。我们已经确定了简要讨论问题的原则，据此，拘泥于各种理论的编年顺序常常是不可能的。希腊科学的历史延续了近十个世纪，因此“希腊人发现”和“希腊人认为”的种种说法几乎模糊得难以容忍。但是，历史常常以一种删减后的面貌呈现在我们面前，所以，用上述说法来表现历史往往是不可避免的。

## 天文学

我们已经看到柏拉图要求以匀速运动来补救天体的运动，这就开辟了数学天文学的发展道路。著名数学家克尼底斯的欧多克斯（约公元前408—355）试图满足这个要求，在他的同心球理论中，假定太阳、月亮和五颗行星是一组彼此适应的转动同心球体，在每一组中，位置在外边的球体一一套着位置在里边的球体。

天体在同心球体最内层的赤道上。旋转轴和圆周运动周期是按照使天体的合成运动与实际观测相一致的方法选定的。欧多克斯一共设置了27个同心球：恒星占一个球体，五颗行星每颗占四个球体，太阳和月亮各占三个球体。

每一个行星在该球体组中的第二个球体表面按照 8 字形曲线运动。人们在观察时所见到的行星运动中的逆行和停留现象，就

以这条曲线和黄道带中的运动来说明。

这种理论鲜明地表现了希腊人是从数学角度考虑天文学问题的，它不涉及使真实天体运动起来的机理，也不追究这些球体是由什么形成的，它们彼此怎样在物理上相互适应、它们的动力是从何而来的。这些球体是数学上的球体，每组最内层的球体并没有真正携带着太阳、月亮或某个行星，而只是代表着天体的一个数学上的点。整个系统是这些天体真实运动的运动学说明。在真正的柏拉图主义者看来，这个系统是一个理想的实在，而通过感官感知的星空是一个不完美的复制品。

希腊天文学家虽然在思想上有柏拉图主义的倾向，但是他们颇具科学精神，他们认识到经验是评价数学表述的标准，最终能使数学推论和观测所揭示的现象相一致。

欧多克斯体系没有做到这一点。在这个体系中，因为所有的球体都是以地球为中心的，那么从所有天体到地球上观测者的距离，就应该是一个常数，但是已知至少有几个天体的视直径是变化的。因此，有足够的理由否定欧多克斯体系。

这里我们不能涉及某些现代人对于欧多克斯体系数量状态引人入胜的重构，也无法谈论卡立普斯（生于公元前370）和亚里士多德所增加的内容。

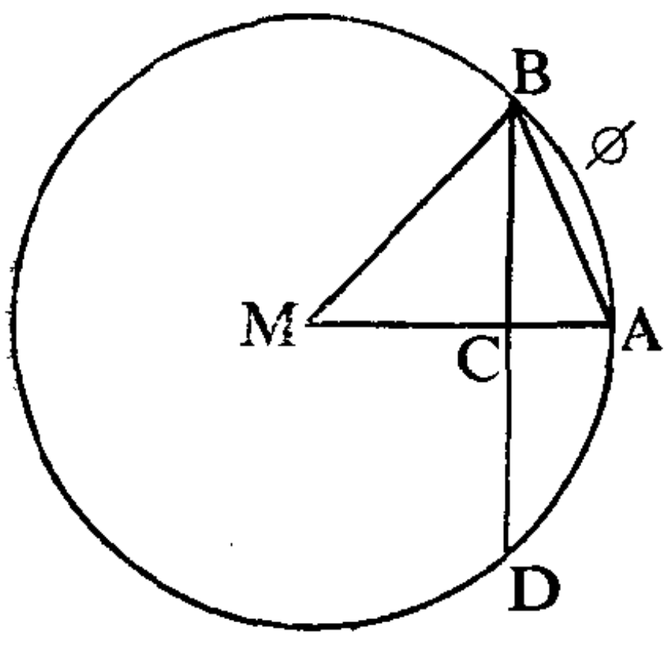
天文学家希帕克（公元前二世纪）提出一种完全不同的方法来“补救”天文现象。这种方法建立在阿波罗尼乌斯发现的基础上。亚历山大里亚天文学家托勒密（公元二世纪）进一步精炼和发挥了这个理论，并把它收入希腊数学天文学手册，这部手册以《至大论》为题留传下来（希腊书名的阿拉伯译名误为《伟大作品》）。直到十六世纪，天文学家的思想实际上一直受这本书的支配。希腊文明对于世界历史产生了巨大影响，这本书是最显著的范例之一。

我们在这里不去探讨在《至大论》中哪些是希帕克的思想财富、哪些是托勒密的个人贡献，这部著作论述的范围广大，涉及

的内容复杂，我们不能对其详加讨论。我们仅对该书的内容作简要介绍，对其使用的某些方法略作说明。

托勒密是不折不扣的柏拉图主义者。他认为，天文学的任务是发明天体运动的数学体系，不需要说明这些体系怎样在物理上实现。虽然如此，在导言（从根本上说，它来自亚里士多德物理学）的论述中，他不肯为了“补救”观测现象而把地球看作是运动着的星体。他承认从数学角度可以把星空的周日运动看作是地球绕自轴的周日运动的反映，但坚持认为从物理上来说这是荒谬的。他的主要论据是：如果地球从西向东旋转（这种假设可以解释天空每天由东向西的运动），我们应该看到地球上所有的东西急速向西移动，而不应是紧紧与地球相随。许多世纪以来人们不断重复这个说法。后来，这个问题有一种具体的表述方法：一块石头垂直向上抛出，其落点应在投掷点的西边。在这里我们可以看到古代惯性定律的影响：一旦物体与地球失掉联系，那么从地球得到的运动立即消失，物体留在后边。

托勒密在《至大论》第一卷的最后几章论述了希腊测量学和三角学原理，这些原理的应用贯穿在整部著作中。这本书的论证方法与现在不同，如AB弧＝圆心角$\phi$（见图1）决定于弦AB而不是其正弦BC（即二倍AB弧所对应的弦BD的一半）。这样看起来比较简单，但没有在更为严密分析的基础上进行证明。应该说，按希腊人的方法，全部计算结果可以直接换算成我们熟悉的



（图1）希腊的弦函数和现代的正弦函数的关系。

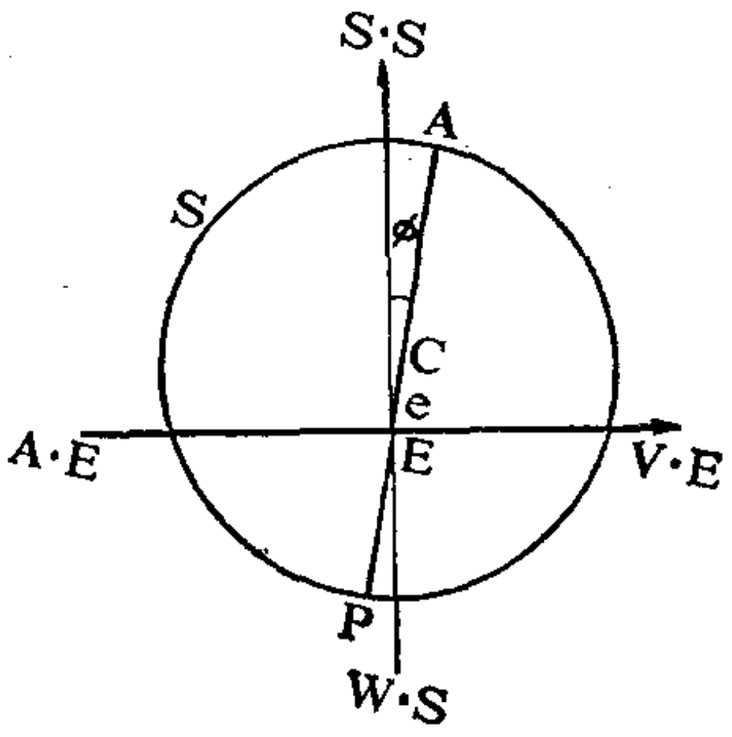
比率式：

$$\mathrm{crd}\phi = 2\sin\frac{\phi}{2}$$

其中$\mathrm{crd}\phi$表示与弧对应的弦。所以托勒密制订的对弦表和他对此

表计算的说明，也可以作正弦表使用。在准备了必要的数学工具以后，托勒密在第一卷和第二卷的其余部分，论述了球面天文学的所有内容。

第三卷论述太阳的运动。在这里，我们碰到一个概念：偏心圆运动。这个概念很能代表希腊天文学的特点，它被用来解释四季长短不等的原因，这是早在公元前五世纪就已经知道的事实。这一事实说明太阳不是匀速地经过黄道带，这就和柏拉图的公理相矛盾了。要与柏拉图的公理——太阳匀速通过黄道带——相一致，那么就要假设地球上观察者的位置不在圆心C而在偏心点E（见图2）。把偏心观察者这一提法换一下，可称这种圆周运动为偏心圆运动，称这个圆周为偏心圆。



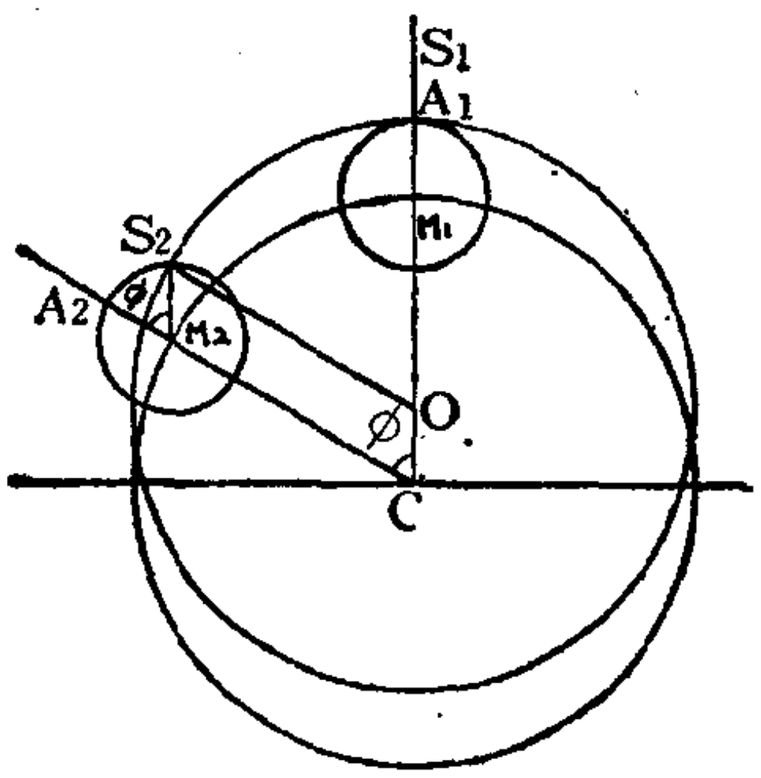

（图 2）偏心运动。
太阳S匀速地在以C为圆心的圆上绕行，但在E点的观察者看来太阳的运动不是匀速的。
V.E.＝春分点；S.S.＝夏至；
A.E.＝秋分；W.S.＝冬至。
A＝远地点；P＝近地点；
AP＝拱点线；CE＝e＝偏心率。

由于确定了偏心率 CE＝e（圆的半径在图 1 中已经标明）和角φ，角φ又决定了与周年点有关的拱线的位置，上述理论得到进一步的发展。托勒密算出 $e=\frac{1}{24}$，$\phi=24^\circ 31'$。

（希腊人的表述方式是，远地点位于π5°31′，π 代表黄道十二宫的双子座）。

这样，托勒密证明了可以用另外一种方式来解释天文现象。这种设想情况如下（图3）：观察者站在C点，太阳不按以C点为圆心的圆周运行，而按另一个更小的圆周（称本轮）运行，此圆的圆心M又绕第一个圆周（叫做均轮）运行。最初，假定太阳S位于本轮上的A点，以后A运行到$A_1$，M运行到$M_1$。过些时候，M点就运行到$M_2$，而A运行到$A_2$（必须假定

本轮位于均轮的边缘）。令$M_1CM_2=\phi$，设定太阳也同时行经本轮上的弧度$\phi$但反向运行到$S_2$。显而易见，当观察者站在偏心位置C时，太阳实际上就在以O为圆心的圆周上通过（CO=MA）。因此，这两种假设是相同的。




（图3）特殊的本轮运动。太阳沿圆心为M的圆运动，该圆又绕圆心为C的圆运动。这两种运动都是匀速运动并有相同的角速度，但方向相反，这个特殊的本轮运动和绕O点（CO=MA）的偏心运动相等。

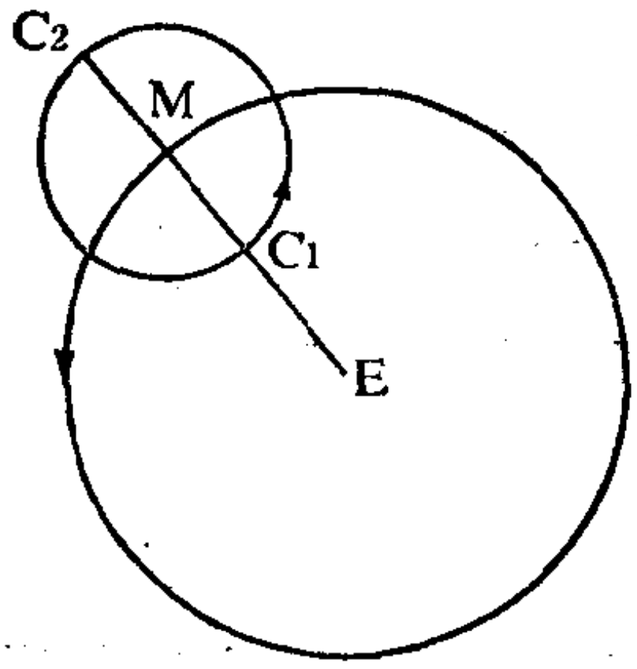
这种作法的特点是不研究实际上太阳怎样运行。显然，这是一个运动学描述的问题，而不是物理机制的问题。

按照上述两种假说中的任何一种，都可以精确地描述太阳轨道的全过程。这很难以惯用的公式表达，然而任何给定时间的太阳观测位置，都可用据此法算出的星表读出来。这种理论计算出来的位置与真正观测到的位置相比较，可以从经验上确定理论的精确性。

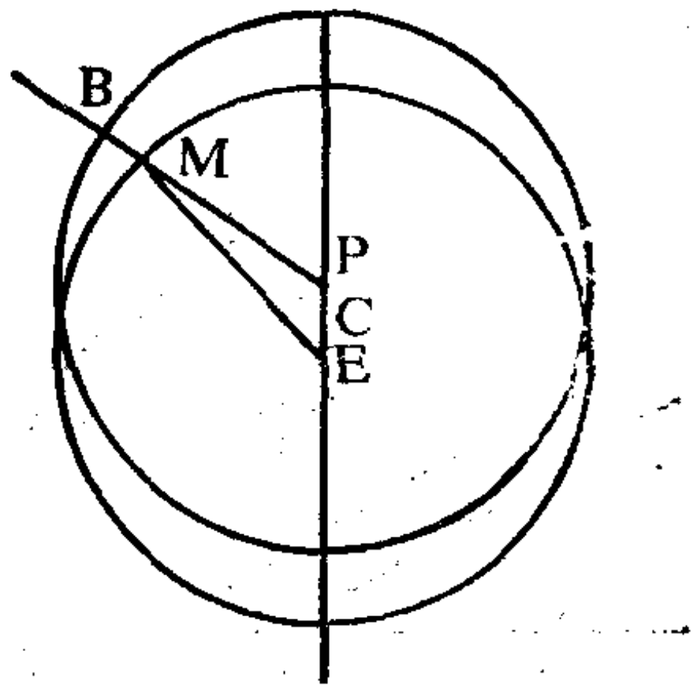
上面所说本轮运动的例子构成很特殊的情况：本轮上运动的角速度等于在均轮上运动的本轮中心的角速度，但方向相反。如果撇开这些特殊的假设，如果本轮运动与一个偏心圆运动相重合，如果均轮中心可以允许看作是绕观测者所在位置的运动，就出现多种其它可能性，这些可能性在以后各卷中被用来解释月球和行星的运动。第四卷和第五卷讨论月球，第九卷至第十三卷讨论五颗行星。我们不能深入探讨这些问题，现在只简单说明为什么本轮运动的方法可以从原则上解释行星的逆行运动。

当行星P（见图4）位于中心为M的本轮上的$C_1$点时，运动方向如图所示，观察者位于E点时看到的是行星与M点的运动方向相反。因为，从E点看，行星在本轮上运动路线的大部分（也

就是当行星沿$C_2$绕行时）与M点运动方向相一致。而当行星绕过$C_1$附近时就是逆行运动。




（图 4）解释逆行现象的一般本轮运动。




（图 5）本轮运动和等分点矢径PM匀速绕等分点P转动。

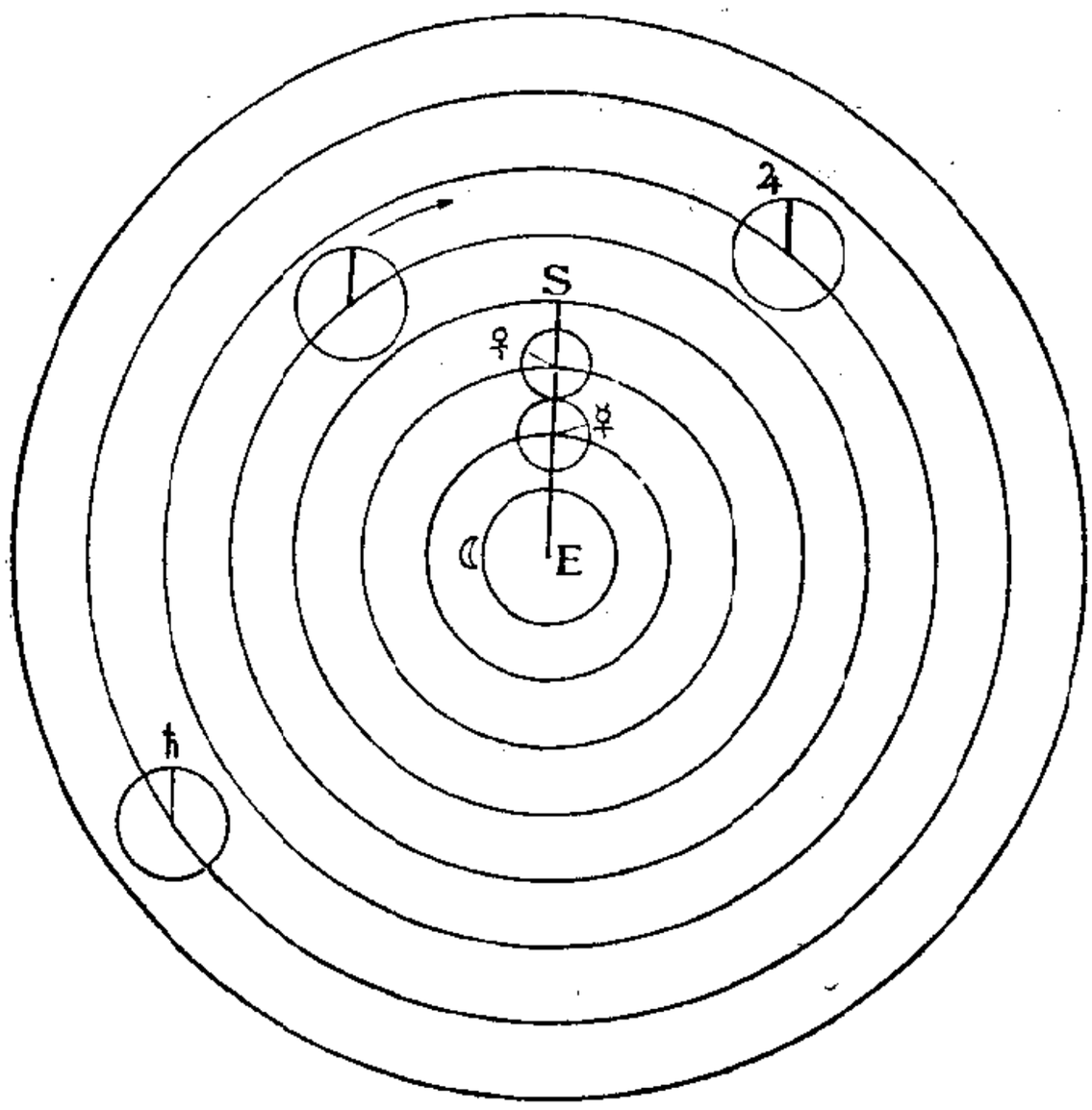
尽管托勒密的各种运动体系极其复杂，他还是没能完全成功地说明观测现象。这迫使他引进另一个具有历史意义的新图景。设本轮中心M点不是沿着矢径CM（它与CA一致作匀速转动）的方向运动，而是沿着矢径PM（P是观察者E眼中位于C 点另侧 的拱线上的一点）的方向在均轮上运动（图 5）。以后，称P为等 分点即平衡点。显然，柏拉图的公理事实上和这个新引进的假设相冲突。当然可以规定，P点是另一个圆（等分圆）的圆心， 圆上的交点B和矢径PM一致，作匀速运转。但这种作法是挽救公理而不是补救天文现象。

我们要结束对《至大论》的简短讨论了。第六卷描述日食和月食，第七卷和第八卷是包括1022个星的星表，给出了每颗星的黄道经纬度及光度。该书还论述了希帕克发现的岁差现象。书中把当时的恒星位置及阿里斯泰路斯和梯莫开里斯（公元前 3 世纪）以前的观察记录相比较，发现许多恒星的黄道经度增加了一个等量，由此得出整个恒星天体是缓慢地运动着的结论。后来类似的现象被当作春分点的反向运动，但是还保留了岁差这一名词。托勒

密计算出岁差的最大值是36″，每世纪相差1°。正确的数值是每年约50″。

这本书也注意到希腊天文学讨论的一个重要问题：恒星的升起和降落。这不是指恒星每日在地平线上的出现或消失，而是指恒星在黎明薄暮时的可见与不可见。这里，我们接触到了天文学最古老的内容。早在科学出现以前，农业生产的某些重要日期就以当时已知的一些恒星的升落为标志。

以上对《至大论》的内容作了简短总结。我们现在略去托勒密体系的所有细节（其中包含着最重要的成就），而作最简单的框架式说明（图6）。假设观察者不在偏心圆上，也没有等分点等




（图6）托勒密体系简图。

E＝地球，　☿＝水星，　♀＝金星，　S＝太阳，
↗＝火星，　4＝木星，　♄＝土星，　☾＝月球。

等，那么这个体系的特点愈来愈清楚了——所有的行星的运动都与太阳的运动有关系。对于内行星，本轮中心位于地日连线上；对于外行星，从本轮中心到行星的矢径和地日连线平行。这是一

个标志，说明太阳和绕地球运行的其它六个天体不一样。实际上，观测已经完成，但是没有从中得出天文学上的结论。

我们需要从以上所说的宇宙图景的简单描述中引申出三点看法：

（1）在托勒密体系中，地球不是天体运动的中心，但静止不动；因此，最好把这个体系称为“地静说”，而不要按习惯称为“地心说”。

（2）并非所有的希腊天文学体系都是“地静说”。

（3）数学天文学的唯一目的是对天体运动作运动学描述；除此之外还有物理天文学，其目的是研究说明人们所看到的天文现象实际上是怎样发生的。

关于第二点，我们要说明，根据阿基米德(公元前287—212)的记载，天文学家、萨摩斯的阿利斯塔克（约公元前320—250）提出过一个日心宇宙体系。在这个体系中，地球是和其它行星一样的一颗行星，每年绕行太阳一周，每天绕自轴转一周。所以，阿利斯塔克可以说是古代的哥白尼。

阿利斯塔克对于以后希腊天文学的发展没有发生明显的影响。他并没有把自己的体系发展得很详细，使之可用于计算和制订星表，解释太阳、月亮和行星的运动，而这些才是天文学理论的主要目的。地球运动的观念是与希腊人的一般物理概念强烈冲突的，我们从托勒密的例子可以看到这一点。地动的概念确实不是在精细的数学虚构范围之内形成的。要想使地动学说真正成熟，必须有物理学上的根本变化。

在希腊人看来，物理天文学是哲学家的事情，数学家可以任意地编造那些在他们看来有利于自己特殊的技术天文学的东西。至于从形而上学的角度确定在宇宙中实际发生什么运动，那是哲学家的事情。显然，偏心圆、本轮和等分点对于哲学家没有多少用处。不过，托勒密还是进行了专门的研究，使得他的数学体系在一定程度上可以从物理上实现。

公元前最后一个世纪，希腊天文学家精心完成了以编制星表为目的的上述天体系统，这些星表用以推算某个天体在某个确定时间的位置。就在这个时期，美索不达米亚天文学也以完全不同的方式达到了这一点，这就是通常所说的塞硫古或迦勒底天文学。*

这种天文学无疑也是使用运动的几何体系说明观测到的天体运动的位置，但却以纯粹的算术方法来表示。这就是它与希腊方法的显著区别。最好从用于这个目的的两个体系中各选一例来说明这种区别。

第一个体系比较简单，通常认为是陈旧的，其中对于太阳的运动这样描述：假定太阳以特定的速度匀速通过黄道带的特定弧，又以不同的速度匀速通过余弧。关键的问题在于选择什么弧和速度，才能和观测到的位置最为接近。第二个体系较为复杂（第一个体系与之并存），在这个体系中，每个月份有不同的固定速度，其值按照一种算术数列确定增加或减少。如果把这些值在曲线上标出，这些点可以连成Z形线。由于这个原因，人们有时说塞硫古的天文学家们应用了Z形函数。然而，由此推想巴比仑泥板有Z形线是错误的。

上述第二种方法也以不同的方式应用于月球和行星的运动。尽可能准确地表示月球的位置，是有很大实际意义的：因为由此可以预先计算出日落以后在西方天空中渐渐增大的新月在什么时候首次出现，这就是新的月份的开始。由此出现了许多复杂的星表，这些星表的解释大体上是成功的，但并非十全十美。在行星中，水星显然研究得最为精确。这颗行星的星表相当复杂，可以读出太阳升起的时刻和停留的位置。

必须记住，所有这些星表表示的是理论计算的位置而不是观

---

*公元前312—65年塞硫古王朝统治近东，因而有塞硫古时期之称，此时的天文学称为塞硫古天文学。在晚期巴比仑的意义上，有时又称为迦勒底天文学。——原注

测到的位置。真实的位置也以算术的方式载于星表中。这些数据与观测结果怎样联系起来还没有弄清楚。

我们考虑到迦勒底天文学和希腊天文学是在同一时期、在有文化接触的不同国家中发展起来的，那么这两种天文学在方法上的根本区别就值得注意了。这种区别告诉我们，在两种天文学体系中，一个体系由另一体系引申而来，或者一个体系是另一体系的延续，都是不可能的。这就更加令人不解了，因为希腊天文学家从巴比仑人那里继承了许多实际资料，这是确定的事实。希帕克提到的天文学常数无疑来自巴比仑；托勒密也利用了巴比仑的许多观测资料。

这就是迦勒底天文学影响天文学发展的唯一途径。Z 形函数的方法早已失传。后来的天文学完全溯源于希腊人的思想。

## 力学

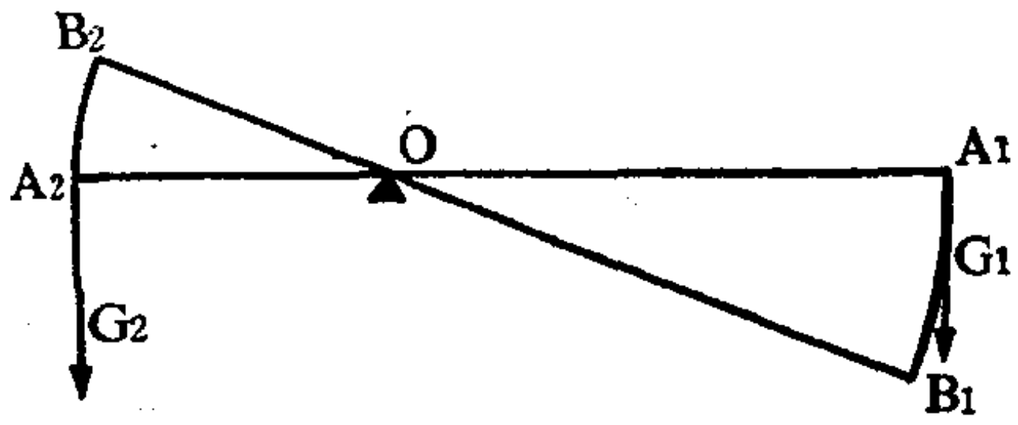
按字源来说，力学这个词本来的意义是指对机械的研究。随着自然科学的发展，它的主要意义变化为对于运动着的（包括一种特殊情况——平衡）物体作数学研究。正象几何学是从研究物体的形状和大小中发展起来的一样，力学的产生是对于外界物体运动作理想化抽象化考虑的结果。

古代希腊人已经熟悉五种最重要的简单机械：杠杆、滑轮、卷扬机、楔子和螺旋，不过很快又增加了嵌齿轮。在亚历山大里亚力学家希罗（公元一世纪？）的著作中，有巧妙应用这些工具及其组合的记录。在他的著作中记述着一项普遍的定律：任何一个省力的机械装置反而要相应加长该力作用的距离。其后一个时期，这条定律被表述如下：机械装置并不节省劳动。这个思想本身是十分古老的，有一个故事说：阿基米德发明了一种装置，他从容不迫地操纵这台机械，把为叙拉古国王希隆（死于公元前215年）建造的一艘船拖下水去，这艘船建成后一直置放海岸无法挪动。这个故事准确而生动地说明了上述思想。颂传他曾在这种

情况下说过一句名言："给我一个支点，我将推动地球"。当然，现在推想他是用什么样的机械来完成这个任务的，没有什么意义。

希腊科学提供了两个具有重大历史意义的理论力学的例子，即杠杆平衡定理（力与力臂成反比）的两条证明，显然人们不愿立即作为经验结果来接受它们。第一条定理记载于题为《力学》（实际上是《力学问题》）的一篇文献中。这篇著作以前被认为是亚里士多德或亚里士多德学派的著作，现在认为是拉姆普萨卡斯的物理学家斯特拉顿（死于公元前270）的著作，他是吕克昂学园的第二任后继领导者。第二条定理是阿基米德在他的《论平面的平行》著作中提出的。

亚里士多德的推论立足于下述观察（图7）：在杠杆上$A_1$和$A_2$两点分别悬挂重物$G_1$和$G_2$使之平衡，当横木绕支点O转动时，可见$A_1$和$A_2$同时移动，位移$A_1B_1$和$A_2B_2$与从支点到悬点的距离成正比，由于它们是同时发生的，所以这也用于悬点的移动速度。因此，重量与力臂成反比，可以想象为重量与速度成反比。这种情形可以从逍遥学派的动力学基本定律去理解。按照这条定律：这两个重物中，一重物是另一重物的动力；近距离处的大重量物体与相当比例的远距离处的小重量物体等效。




（图7）亚里士多德关于杠杆原理的证明。

现代读者不能十分信服这种推理。他们当然感到各种不同的力学概念混淆在一起，特别不能理解为什么要把时间引入这个问题。我们还看到，亚里士多德的这种推论包含了一条重要的力学基本定律（记住它的起源）的胚芽。这个定律称为虚速度或虚位移（或者虚功）定律。

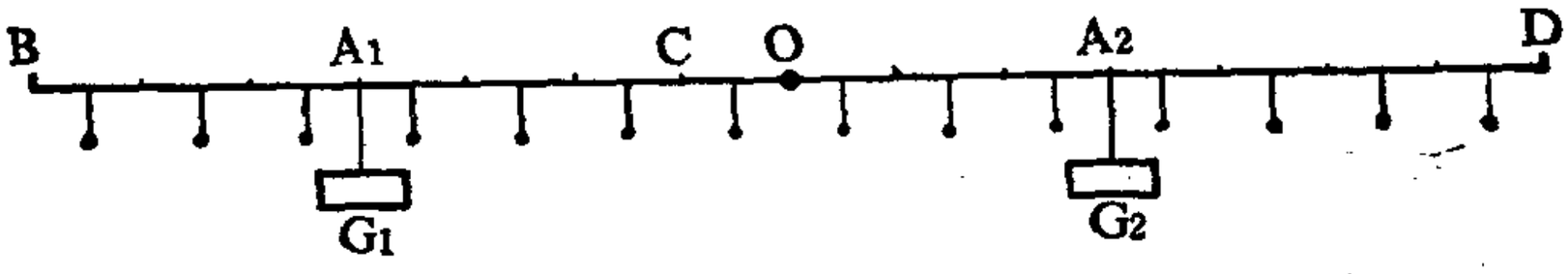
阿基米德对于杠杆原理的证明，是按照欧几里德的方法在一

系列预想的定理和公理基础上提出的。这些公理包括：

（1）负荷相等的杠杆保持平衡。

（2）悬挂在杠杆上的一物体如可被另一相等重量的物体所代替，证明悬点到支点的距离没有变化。

下一步的证明是（图 8）：重物$G_1$和$G_2$悬挂在绕0 旋转的横杠上的$A_1$和$A_2$点处。假定$G_1:G_2=n_1:n_2$，式中$n_1$和$n_2$为整数。因此




（图8）阿基米德关于杠杆原理的证明。

可假定$G_1=n_1p$和$G_2=n_2p$。当

$$G_1:G_2=OA_2:OA_1$$

时，可以证明杠杆保持平衡。同理，也可设$OA_2=n_1t$和$OA_1=n_2t$。现在令$A_1B=A_1C=OA_2$，则$A_2C=OA_1$。再令$A_2D=OA_1$，则OB＝OD。然后，把BC分为$2n_1$份，每份为t，把CD分为$2n_2$份，每份为t。在BC分成的每一个小份t的中心，悬重量$\frac{P}{2}$共$2n_1$个以代替$G_1$，亦即以$n_1p$代替$G_1$；同样，在CD分成的每一个小份 t 的中心，悬重量$\frac{P}{2}$共$2n_2$个以代替$G_2$，即以$n_2p$代替$G_2$。这与公理(2)有关，公理（2）保证了上述论证成立。显然，阿基米德认为悬挂在杠杆上的两组物体，每组物体的公共重心不因分割而发生位置变化。以此作为论证的基础。可惜我们并不知道这个重心理论的中心在哪里。

按第（1）条公理，负荷相等则杠杆保持平衡。

接下去的一个命题证明，如果$G_1$与$G_2$不成整数比，$OA_1$与$OA_2$也不成整数比，定理仍然成立。

我们且不深入讨论上面的重复证明是否真正有效，以及第（2）条公理在本质上是否和要证明的定理并不一致。无论如何，上述证明是非常巧妙的，在力学史上是十分重要的。它开辟了一个自然科学分支进行数学研究的道路，因而对以后的发展具有强大的推动作用。在古代，这种方法没有取得更进一步的成就。有一种尝试是以类似的方法探索斜面定律：两个重物分别位于两个斜面上，通过滑轮和绳索把这两个重物连接起来，研究两个重物的关系。不过，这些努力没有成功。

使用上述数学方法处理问题，只有在一开始就把位置看作是理想的才有可能。这就是说不考虑摩擦和空气阻力；不考虑导致不精确有效关系出现的其它因素；也不考虑某个天然的杠杆或斜面上互相平衡的两重物的重量值在一定范围内是变化的。所有这些情况说明，希腊的科学思想有很强的数学倾向。

亚里士多德的学生和注释者补充和修订了他有关落体运动和抛射物体运动的观点。他们知道落体运动是加速运动，但不明白这种运动是怎样发生的。斯特拉顿肯定在《论运动》一书中讨论了这个问题，不幸的是这本书没有留传下来，我们只能猜测他对这个问题的贡献。有一种猜测是，他认为一个落体的瞬时速度和运动开始经过的全部路程成比例。他可能是否认轻物体与重物体的区别的（而这一点在亚里士多德体系中占有重要地位），他可能认为所有物体都是重的，因而很自然地向下坠落。但是，这就会产生下面的看法：轻的物体是被比它更重的物体追使向上，因而显现为轻的。那么，绝对的重物怎样和相对重物全然分开，就成了问题。天文学家希帕克在《论物体由于重量而向下降落》一书中也有相同的观点。

注释家菲罗波诺斯（公元六世纪前半叶）关于落体和抛射物体的观点具有重大历史意义。在经验的基础上，他反对亚里士多德学派的落体定律，反对重物下落快的论点，因为物体在重量上的差别不是很大，在一定的距离内，下落时间的差别不可觉察。

他也反对在周围介质中寻找抛射物体推动力的理论；他把抛射物体的推动力看成是抛射者通过抛射动作而分给物体的一种无形的运动力。这种观点以后在经院学派的冲力论中重新出现。

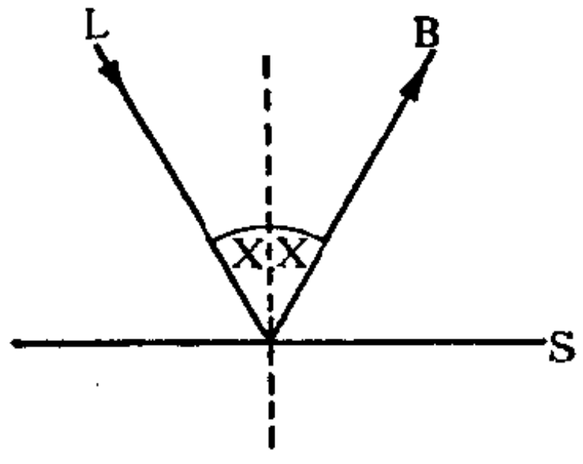
## 流体静力学

在流体静力学方面，古代人提出了浮力定律。浮力是物体浸入液体时出现的现象。是阿基米德发现了这个定律，今天仍然以他的名字命名。在《论浮动物体》一书中，他在事先假定的定义和公理基础上推导出浮力定律，这与证明杠杆定律的方法如出一辙，这些公理是从亚里士多德物理学中得来的，很难令人信服，因此现代读者不能接受。阿基米德只是把这个原理作为他对旋转圆柱体的稳定悬浮状态进行复杂数学研究的出发点。

在古代，偶尔也用它来确定物质的比重。我们已经知道，斯特拉顿和希帕克提出了一种轻的概念，这个概念遭到了反对。上述反对意见得到浮力理论的有力支持。斯特拉顿和希帕克的意见被普遍反对是毫无疑问的，相反，浮力理论多少世纪以来是物理学无懈可击的基础。

## 光学

上面我们说明了希腊人转向用数学方法思考自然界的问题，这样，几何光学终于随着对于光线的几何研究产生了。古代人很早就知道，光线在镜面上的入射角和反射角相等。希罗记载了下面的关系（图9）：来自L点的光线，被平面镜反射至B点，光线循最短路程从L 经镜面 至 B。这里我们看到了一个称之为 极 值 原 理 的最古老的例子。这个原理在以后的物理学中起着很重要的作用，它和造物主按最简单的方式起作用的看法相联系。




（图9）希罗的原理。自L经镜至B，光线行经最短路程。

这又是有关圆柱或球面镜的理论。我们不深入讨论这些问题。因为准确的数学处理在这里很难做到，而希腊人又没有提出有关的近似理论。

研究光线折射的屈光学和研究光线反射的反射光学不同。光线折射的基本现象已经了解。托勒密算出了入射角和折射角的余角值，而没有确定二者之间的正确函数关系。他给出的数值极端严格，不容丝毫怀疑。

关于镜面的实际应用，有个故事说，当叙拉古被罗马人包围时，阿基米德用镜面反射集中太阳光的办法，使敌军舰只着火。因此，许多人写文章讨论阿基米德是否做到以及如何做到了这一点。

许多作者都很注意视觉是如何发生的问题。按照传播最为广泛的可见光理论，光线是从眼发出，察照所要接受的物体，提供有关这些物体的印象。原子论者认为我们看见物体是因为物体发射图象（形象、影象），这些图象射入眼睛，激起感觉。原子论者的另一种主张是，物体发射的图象通过太阳的作用在空气中凝聚成一个摹本，进入眼睛的不是图象本身而是摹本。柏拉图提出了一种理论，认为发自眼睛的光线与物体的流出物混合起来，在感知对象和视觉器官之间形成桥梁，它受前者的影响而刺激后者的知觉。

亚里士多德否认有某种物理的东西在客体与眼睛之间移动的观点。按照他的意见，视觉是由物体通过媒质作用于视觉器官而形成的，媒质具有透明的本性，但必须先要以发光物质（火、以太）来实现，然后才能完成它的作用。真正的透明媒质就能把客体的颜色效应传递给眼睛。颜色是物体可见的真正原因，而光线只是把所要求的条件变为现实。

斯多噶派的一个理论是，从灵魂的中央器官（控制器官）发出一种视觉灵气，这种灵气通过眼睛瞳孔而进入外间世界，在眼睛和客体间的空气中造成一种紧张状态（张力）。通过这种紧张的空气，眼睛可以察看这些客体因而获得他们形状的印象。

## 气体力学

气体力学包括后来物理学用空气压力解释的全部现象。最重要的问题大多是关于真空可能性的问题。亚里士多德断然否定真空的存在。他的这个观点绝大部分为后人所接受，但无论如何这只涉及宏观空间，是从连贯的、可以感知其大小的空间角度来说的。为了说明真空显然是不可能的，他阐述了吸收或注入式虹吸和吸杯的作用，其中主要是虹吸作用。他认为，在虹吸装置中，液体违反本性上升，就是由于在空气和水之间形成了造物主所不允许的真空，否则是不会如此的。但是，从原子论的宇宙观来看，必须假定有一种微小的真空存在于原子之间，否则原子将没有空间可以移动。气体力学有许多实际应用，其中也应用热现象，这与希罗有关。最著名的是蒸汽球，在架子上安装可旋转的球，从喷口不断喷汽，使球转动。

## 声学

在这里要区分数学和物理两个分支。第一个分支是由相当复杂的音程理论、音阶理论及包含音阶（全音阶、半音阶、等音阶）的复杂理论组成。这个分支对于音乐理论的发展要比对于科学理论的发展更为重要，因此在这里我们不准备进一步加以考虑。第二个分支试图弄清声音在空气中的传播和声调高低的区分。这方面没有取得有永久价值的成果。也确实有些看法和意见描述纵波在空气中的传播，说明高音调与快速运动有关系，低音调与缓慢运动有关系。但在有关音调的论述中，我们一再发现发音体微粒的振动速度是和在空气传播中出现的平衡扰动速度混淆在一起的。

## 气象学

气象这个字是从希腊文来的，意为“空气中的东西”。这个学

科包括了所有在大气中发生的、或者认为是在大气中发生的现象。因此，包括彗星、流星、虹、晕和幻日、雨、雪、雹、露、白霜、雷、闪电等等。自然地理学和岩相学也在气象学的范围之内。

这个领域最有名的著作是亚里士多德的《气象学》,这部四卷本的著作，不只涉及气象学方面，也涉及多种物理一化学过程，诸如成熟、腐朽、沸腾、烤焙、熔化、凝固等等。这部书也不是他自己写的。有人推测，现在看到的这部书是物理学家斯特拉顿所著。

从气象学本意上研究虹和类似的大气现象，是值得注意的。亚里士多德及其注释者认为，无论在水滴中还是整个云天中出现的这类现象都是由于太阳光的反射。然而，有迹象表明，古代人在说明解释这些现象时，就企图把衍射包括在内。

## 电学和磁学

在今天，自然科学的这两个分支是非常先进的。但是在古代，人们只知道两个最基本的现象。这就是摩擦琥珀可使轻物移动和一块铁会向磁铁矿移动。这两个现象都没有进一步的用处。但是，他们所知道的现象并非毫无意义。琥珀的希腊名字就是电这个词的来源。泰勒斯看到磁的现象感到惊奇，他猜想在磁铁中居住着一个灵魂，是它移动了铁块。以后有许多看法支持这种见解。这主要是因为我们发现从古代起，人们说磁铁吸引铁块，而不说铁块驱向磁铁。虽然观察资料并没有揭示出“吸引”一词所指的内容以具体说明磁铁产生的效应。

# 第四章

# 希腊和罗马的工程与技术

与希腊和前古典时期科学之间可以观察到的中断相反，在前古典时期和古典时期的工程或技术之间并不存在这样的间断现象。这并不意味着希腊人和罗马人没有提出独创的思想和发明，只是这些思想和发明是建立在以使用人力和畜力为限度的技术之上，因此，就限制了机械的大小并使作用客体局限于这种技术能够掌握及操作的范围内。此外，由于文明向西推移，希腊及以后的罗马相继成为世界政治的主要因素，因而某些工程技术领域变得比以前更重要了。各希腊王国和罗马帝国比从前的帝国更致力于公共工程和交通运输，因而我们在这些领域发现的活动较多，而其他方面则较少。

## 磨及压机

其他一些因素也起着作用。古典农业和古代近东农业之间存在显著的差别。后者主要依靠灌溉，依靠上涨河水的疏导和贮蓄技术；前者则很少采用灌溉技术，而依靠把冬季和春季降于地层表面的雨水一直保持到干旱的夏季。这涉及各种不同的技术和装置。在埃及和美索不达米亚，希腊工程师们促进了向高地提水这种繁重劳动的机械化，他们制成一些更好、更精致的机械，如水库轮，有分隔空腔

的提水轮及阿基米德螺旋提水器，后者在这位伟大的数学家在世时首先在埃及加以使用。在阿拉伯人把灌溉技术带入西方各国以种植用水量大的稻谷和其他粮食之前，这类机械并未在古典世界普遍使用。古典时期的农民种植小麦和大麦，但以后逐步专门生产橄榄油和葡萄酒，在埃及、非洲、西班牙或高卢等地用以交换谷物。橄榄油（他们的主要油脂原料）和葡萄酒的生产都需专用设备。

希腊人已经深入地研究了葡萄树的种植、嫁接和支架技艺，由于采用较为有效的挤压技术，葡萄酒的质量也明显提高。近东采用的最好挤压形式是用袋挤，就是把踩过的葡萄放入袋内，然后再拧挤。一种有效得多的挤压形式是用杆挤，大概是早在公元前二千年，在爱琴海沿岸地区发明的。这种方法运用杠杆原理，重杆的一端铰接于墙内或两粗石之间，另一端则加上重物。杆的中部挤压一堆盛着橄榄或葡萄的袋子。由于运用外加的负重，遂可获得大于一个人的挤压力。

公元前一世纪及以后的罗马工程师们由于发明绳子和滑轮把杆的一端压下，或用螺旋将它拧下的方法，从而改进了这类杆式压机，这样就使酒商可能在压机上运用各种作用力。他们还发明了螺旋压力机，它们或是用夹持于框架内的螺旋使一个帽盖压向压机机身，使压机的作用力直接作用于物体，很象现代的仿形压机；或是由杆端的两个螺旋把杆向下拧紧从而挤压物体，如同织物压机那样。他们发明的第三种压机是楔状压机，这时各楔块挤在用框架固定住的橄榄或葡萄袋垛之间。杆式压机用于挤压橄榄和葡萄；螺旋和楔状压机则逐步地更专用于挤压油籽、纸莎页、织物，用于从草本和根茎中制取油料以及制备香料油。

由东方传入的旋转磨也有所改进。罗马人的商用驴拉磨由在锥形下石盘上转动的沙漏形上石盘组成。动力首先是用两个奴隶或一头驴或骡子，以后则采用水力。手推磨也经罗马人有了很大改进，他们似乎已经发明了小型木制胡椒磨，它是现代磨咖啡装

置的雏形。

## 供水

古代亚美尼亚居民已借助挖掘山坡的小渠把地下水用来灌溉他们的田野。亚述人把这类水渠精心修筑成最早的导水渠形式。塞纳赫瑞勃和他的父亲萨贡二世一样，也想从山涧、拦截的河川、山坡的流水口引水以扩大耕地。公元前703年，他修建巨大的沟渠以灌溉尼尼微和他的莎萨别特宫殿之间的地区。直至目前，在亚美尼亚、伊朗和其他东方国家仍保留流水口以灌溉田地，而希腊工程师则把它们转变成其他的用途。

在迈锡尼时代希腊已建立城市供水系统，由于希腊医生们强调优质水源对城市居民健康的重要性，古希腊人建成一些沟渠向城市提供优质饮用水和洗浴用水。其中最早的一个是萨莫斯渠，由欧帕里诺斯建于公元前530年，它包括一条1100米长的水渠。实际上，约在公元前700年，罕兹金赫王已在他的耶路撒冷城内修了一条很长的水渠通至西罗泉。不过东方的这类“水渠”是一种在城墙外面引水的保护性措施，而不是象希腊和罗马的沟渠那样，作为向城市大量供水用的水道。

希腊工程师们已学会用虹吸管穿过水源和城市之间的深谷，但他们深知这种用空心树干或石柱保护起来的高压铅管耗资甚巨，如果在山谷间架桥通过导水渠较为便宜，他们就宁可采用这种方法。但虹吸管在此时和以后已得到应用，例如在帕加蒙渠中（公元前179—159年）。罗马人使沟渠系统更加完善，它们使水经沉淀槽流入城镇附近水丘内的配水设备或水塔，然后再根据需要分流至住舍、浴池和水池。凡杜里型供水管控制由总管线分流至罗马房主家中的耗水量，并保证当局根据用水量收款。这种供水管是最早的设备标准件之一，它们的尺寸和容量完全按规定制成。古罗马人熟知水的控制和试验方法，对沟渠经常加以检查和清洁，并有专人检修。

## 建筑

古典世界的人们很了解完善下水道的重要意义。从印度河谷至埃及较古老城市内，都有良好的排水系统，爱琴海地区的人们把它们加以吸收并运用于希腊和罗马，那里的公共卫生是由专门机构承担的任务。实际上，古典世界的供水和公共卫生要比许多世纪以后的西欧好得多。直至上世纪前，西欧的公共卫生水平还没有超过罗马帝国时期的标准。

古典建筑家们发展了他们自己的建筑形式，它们需要新的工具和机械。虽然亚述人在约公元前800年就已经知道滑轮，但在建筑施工中未起很大作用。然而，在古典世界已经运用由手、脚驱动的吊车以吊起装饰庙宇和公共建筑的柱子。这种吊车的理论是力学家们提供的。一些实际的工程师们，象维特鲁维斯·玻利奥（约公元前50—26年），描述过这种吊车演变的几种类型。石灰浆已普遍使用，而罗马人在约公元前150年，在波祖里附近，以后又在爱弗尔（德国）发现了天然凝灰岩，成为（即使是在水下的）一种优质灰泥。罗马人把这种灰泥浆与沙子和石子混合形成混凝土，用于大型公共建筑的中心部分，再盖以彩色大理石块。金属夹板被广泛地用于连接天然的石块。

## 陆路运输

古典世界的陆上交通也向前迈进了一大步。陆上运输在前古典世界意义不大，那时驮畜牵引的商队步履艰难地行进在偶而设有路标的、踩踏出来的路途上。在远距离转运商品方面唯一的进展是骆驼（或者毋宁说是单峰骆驼）的驯养，这种人工驯养是亚述人在约公元前700年作横穿沙漠的运输时开始的。但统治着由许多不同民族组成的帝国的波斯“大王”着手把帝国联结成一个整体。他们的政策之一是改进交通工具，以便更好地控制他们的帝国。

于是他们开始清洁道路，修整损坏的路面，在不能涉水而过的地方建造桥梁，并兴修一系列驿站，站内备有强壮的马匹可供他们设立的信使业务（传令勤务）使用，这类传令勤务使他们与各省会保持紧密的接触。在某些情况下，沿途的驿站设有驻兵的营房，以确保地区内安全往来。在希腊化时期，埃及、叙利亚和小亚细亚的国王模仿并改进了这种安全交通系统。罗马人把它沿袭下来，并使这种政府的通邮和传令服务更加详备。这类公用通道在某些特殊情况下也供一般民用，但旅行者必须获得当局的许可或“护照”，对于各种车辆的最大载重量也有严格规定。

罗马道路系统与前人根本不同。古代人在某些地方用天然石板覆盖他们城市的街道路面，希腊人也是这样做的，他们还搞平道路，并在岩石面内刻出人工的轮辙。但罗马人在修筑人造道路时尽可能先挖出路基槽，道路由妥善设计的四层组成，这种结构有固定的排水沟保护完好的路面以防塌陷。这样的公路绵延数千公里，不仅伸向意大利的农村，而且也伸向新占领的欧洲和近东省份，它们为行进的军队、商队和他们的驮畜提供了既方便又安全的道路。直到拿破仑时代和铁路出现前，旅行的速度从未达到罗马时代这样快，也没有超过这种速度。

某些技术上的困难仍然阻碍在这些经改进的公路上发展大规模的运输。古代的动物套鞔具方法适用于行进缓慢的役牛，但对骡和马匹则不适用，这种鞔具要套在骡马的脖子上，只能使它们发挥一部分能量去牵拉重物。当时也没有完全了解在纵列牲畜上套马具的技艺。因此大宗运输价格昂贵，货物仍然尽可能直接运到最近的港口，然后再经海路或河道船运。另一方面，藉助于路标、里程碑、路线汇编及公路图使旅行大为方便，对它们的需要也刺激了制图学和地理学的兴起。

## 水路运输

海上运输也大有改进。一些早期的帝国已运用各种木筏及内

河小船。埃及的拼合木船系仿照早期的芦苇渔船制作的，而美索不达米亚则制成独木舟，它们均不适于航海。用这些船只尽可能在近海航行，这在古典时期的几百年间已成为惯例。但荷马风格的船只已设有龙骨、船头、船尾柱和翼肋（构架或船骨），并在外侧包以雕刻船板，船板的边缘相互对接。巨大的、精心制作的船只，象二排桨、三排桨及五排桨船的发展使船速加快，并使商人得以穿过例如达达尼尔海峡那样的激流，抵达盛产小麦的克里米亚和南俄。这些船的名称可能表示每排船桨的划手数目，而不是船桨的排数。美索不达米亚的单层甲板大船还使用船帆。逐步使用桨手的战船，例如轻型单层甲板大帆船和重型单层甲板大帆船开始与有帆的商船相区别。

内河驳船与各种海运船只一样也发生了演变。它由钉入大型肋板的重船骨制成，无龙骨，肋板又紧固于原纵船板上，使驳船具有水平方向的强度。在整个古典世界中这类驳船在一定程度上达到标准化，它们支持了繁忙的葡萄酒和谷物的内河运输。此外，希腊化时期的罗马工程师们实现了早期腓尼基人的愿望，他们建筑了防波堤和人工港口，建成了象亚历山大港和奥斯汀那样一些著名的海港。早期修建于海角的海神庙的火光曾为水手的导航服务。以后象著名的亚历山大港灯塔和拉考鲁纳的海克立斯灯塔相继建立。较大的港口设有船坞，可建造和修理一千吨及更大的船舶。

)46
1
3
3
2

## 采矿和冶金

古典世界在一定程度上是与铁器时代最早阶段同时发展的。许多世纪以前人们已经知道陨铁，但还不了解它和作为颜料使用的铁矿石的关系。公元前1500年，亚美尼亚的铁匠已发现由这些分布广泛的有色铁矿石生产铁的适宜方法。铁的冶炼与铜及其合金的冶炼方法完全不同。用木炭还原某种矿石（有时需预先焙烧），生产出熔融的金属，然后将其铸成一定形状，或与其他矿

石或金属作再次冶炼，生产出符合最终产品要求的特种合金，这种方法不适用于铁。炼铁需要较高的温度，先炼出含有矿渣和金属细粒的海绵块，经反复加热和锻打，从铁块中除去溶渣，使制得的熟铁件吸收木炭火中的碳，于是熟铁就被“钢化”。已钢化的熟铁性能可通过渗碳、退火、回火和淬火等方法加以控制。某些矿石适用于坩埚直接炼钢。印度熔炼工的这种“乌兹”钢①一直被作为“中国钢”输入罗马帝国，直至阿拉伯时代它的秘诀传至西方为止。在一千多年的时间里，它吸引着古典世界的锻工们为掌握新的炼铁技术和发明适用的工具及熔炉而努力。他们还不具备可与当代的鼓风炉相比拟的任何设备，也不会生产生铁和液态铸铁。事实上，当偶而形成铸铁时，上述冶铁秘诀就被弃置。

从铜及其合金过渡到熟铁和钢，具有重要的意义。因为锡在古代极其稀少，所以青铜价格昂贵。青铜并不比某些经琢磨的石器更硬，价格也高，因此石器工具和装置在许多交易中持续很久。由于整个古代世界有丰富的铁矿石，人们认识到，在大多数情况下钢化熟铁性能优于石器工具（如犁片），所以对金属的需求增加了。因此，与“贵族式”的铜和青铜相比，可以真正把铁称为平民的金属。因为它为普通工匠提供了较好的工具，使他们能完成更为有效的工作。这时，金属才开始征服世界并取代了仍然沿用的石器或燧石工具和武器。地中海地区的森林开发由于羊群的采食缓慢进行，而冶铁业的发展则使之加速了。木材的价格虽是缓慢的但却有预示性地上升，木炭的情况亦如此。但是，古典世界在很大程度上仍是个农业社会，采矿和冶炼场犹如耕地和草场构成的海洋中的岛屿。

希腊和罗马人在最早的几代锻工和熔炼工所拥有的金属之外，只增加了两个新品种。希腊人学会生产黄铜，其方法是把铜

---

① 一种古印度粗钢。——译者注

棒埋置于木炭和粉末状锌矿石内而对铜棒加热，使它们“渗碳”。这种方法可能起源于公元前一千年的亚美尼亚山区。但是一直到我们所说的这个时期之初，它并没有什么重要意义。在西班牙，罗马冶金家们开始以相当大的规模生产汞，它是用来提取和精炼金和银的。

然而当时对于地表指征和在地下深处矿层之间的相互关系已有一定的了解，大规模的矿石开采和金属生产是由政府发起的，甚至是由政府实施的。罗马人在西班牙以淘汰法（水冲）粉碎含金的矿层以提取巴斯克省的黄金，为此他们兴建了巨大的沟渠。他们也采用汞齐法提取黄金。对不纯的铜和其他金属与铅形成合金；以低温加热这种合金，铅即滴出，并带走银和金。公元前一世纪西班牙铜矿已经采用了这种贱金属“熔融”方法。

希腊人已经能够从铅和铅矿石中提取银，例如雅典附近著名的洛鲁姆矿山。含银量在0.2%以上的铅矿，希腊人都可从中分离出银，而罗马熔炼工则把此极限降低到0.002—0.01%，还从希腊洛鲁姆人的矿渣中再设法炼出银来。贱金属的烤钵冶金法或氧化法的技艺在公元前1500年已用于贵金属，这时此法趋于完善。它与试金石一起用以试验金银制品和硬币的纯度，因而它在炼金术士的实验室内起着重要的作用。硬币（刻有花纹并保证银、金或铜的规定成色）已逐渐代替贵金属块和金属锭，从公元前六世纪起在国际贸易中占统治地位。

16 25
1
3
3
2

罗马人开始在西班牙大规模开采锡矿，以致废弃了布列塔尼矿山。与此同时，从公元前500年起，在康渥尔也局部开采锡矿，它成为国际贸易中的重要因素。甚至在公元三世纪，当淤积的锡已经用尽，而必须从矿脉中开采这种金属时，康涅胥的锡占优势，而露西塔尼亚和加里西亚矿的产量在公元二世纪后迅速下降。

不仅在古代的塞浦路斯和小亚细亚中心，而且在塔斯康尼、东部阿尔卑斯山区和西班牙等地，也都生产了大量的铜。适当的

助熔剂的用途及中间产品如黑铜的作用都已明了。铜矿石的开采受下层土中含水量的限制，因而在西班牙矿井中装上由踏车驱动的、运用分格水轮的大型抽水装置，以达到较深的矿层。罗马的铜和青铜还以硬币和金属锭的形式输出至北部的德意志部落和印度。

由于优质铁矿蕴藏丰富，有许多铁的生产中心。此外，象拉考尼亚、斯塔康克、高卢和西班牙等一些中心，还以铁产品著称。在波河河谷各城市制作的、来自克伦西亚的铜对罗马军队具有重要意义。

## 作战机械

亚述人已经在他们的军队中采用围攻机械。希腊和罗马军队仿此行事，它们的军队已经拥有较高程度的机械化。正是在这个领域，古代工程师们的发明才能表现得最为明显。军队的机械化是从西西里的希腊人反击迦太基斗争的战役开始的。除了习用的围攻机械如撞槌外，还发展了一些新的形式。根据原始形式的石弓研制了机械化的弓或“石弩”及机械化投石器或“弩炮”。据说早在公元前400年，亚历山大里亚的第奥耐西奥斯就已经发明了一种“机枪”，它是能使箭盒内的箭支连续发射的投掷器。石弩炮的轰击帮助第奥耐西奥斯（叙拉古的长老）击退希米尔柯对莫梯厄的进攻（公元前397年）。

马其顿的腓力普及其著名的儿子——亚历山大大帝促进了战争的机械化。在著名的工程师第阿德斯的协助下，使泰雅围攻战的日期大为缩短。在马其顿诸王的编年史中经常可以读到使用上述机械形成火力网以掩护进攻和退却的纪事。一些工程师们，如塔克提克斯（约公元前300），泰西比奥斯（约公元前250）、拜占庭的菲罗（约公元前250）和希罗（约公元一世纪）都写过有关这类机械的专论。大多数这样的机械都依靠筋束或绳索的张力来推动投掷物；虽然经常考虑运用弹簧及压缩空气的弹

性，但尚未充分掌握。

在迦太基围攻战后，缴获的弩炮不少于二千门。罗马军队大量使用这类弩炮和投掷器，把它们置于四轮马车，从而形成了早期的可运输的“活动投掷”炮台。他们还拥有这类机械方面的自己的专家。在维吉梯斯的手册中列举了多种围城机械、炮及构筑工事的方法。在这个领域，我们仅仅发现了计算此类机械的尝试。因此，菲罗为我们提供了关于弩炮内筋束的尺寸和投掷物重量之间的经验公式。这类机械是最为有效的，即使在发明火箭以后，依然沿用了几个世纪。

## 工程师和工匠

古典时期的工程师们表明他们能够娴熟地掌握轮和轴，杠杆，滑轮，楔及无端螺旋等简单机械。他们以巧妙的技艺将这些机械组合形成更为复杂的机器。遗憾的是，除了某些领域如采矿、作战机械和公共工程以外，那些掌权的人对于机械化不感兴趣。工程师们在自己手册内提议的利用自然力为动力的计划得不到政府投资的支持，而科学家或“哲学家”们也对这些优秀工匠们的成果不感兴趣。事实上，据普鲁塔克报告，阿基米德耻于为叙拉古人击退罗马入侵者构筑机械。人们还没有意识到，帮助工程师为公共利益而战胜自然力是科学的任务，虽然晚期帝国的工程师们曾几次表示，对未来工程师的培养需要教育的支持。

只有一种自然力在古代得到了有效的利用，这就是流水的力量。公元前一世纪，罗马工程师的注意力集中于一种原始水轮机，它当时在亚美尼亚山区使用，在中亚、巴尔干、加里西亚、设得兰群岛和斯堪的那维亚等地区一直沿用至今。农民用它推动一组石磨以磨碎谷物。罗马人把它变成完善和有效得多的一种机械——水轮，最早期的水轮能提供三至五匹马力，是原始水轮的六倍。

这种原动机可以替人或不能再出力的牲畜驱动机械，从而使

建造规模更大、功率更高的机械成为可能。但有几项因素使这种水轮的推广缓慢。地中海地区的河流，全年水量充沛时很少，难以经济地使用水轮，大多数古代水轮都是由代价昂贵的沟渠引来人工水源驱动的。许多古代人认为自然力是超自然的神所支配的，把应用自然力看成一种渎神行为。他们也没有博爱概念，是这种概念驱使我们将人和动物身上的重负转由自然力承担。但首要的是，除极少数例外，古代经济还没有条件吸收成批生产的产品。而在那些例外情况下，水轮机确实赢得了自己的地位。尽管有权势的人表示反对，他们声称担心奴隶和工人们懒散闹事，但这个时期的头几百年，罗马、雅典和其他大城市，以及法兰西南部阿兰斯附近的巴别格尔等军事中心，仍用水轮带动磨粉机。然而其推广是缓慢的，若干世纪后才促成了机械化的实现。

## 纺织

大多数手艺的发展并不是机械化刺激的结果，因为在许多情况下，这类手艺是一种产量低的家庭手工业，很少是作坊内全日专职工作，完全不象现代的工厂那样。这种分析用于纺织业就是，不论在希腊还是罗马，甚至在帝国时期，纺织业都是一种家庭手工业。奥古斯都皇帝以其妻女自行纺纱织布解决穿衣问题而自豪，确实有许多罗马人都是这样做的。富裕家庭也把这项工作交给专门的奴隶。事实上，我们发现没有什么重要的纺纱织布工人的组织，在古罗马政治生活中反映出来的唯一组织是漂洗工人和缝缀被子工人的行会。前者把从各个家庭购来的衣服加以漂洗、染色并作最后修饰，以便在自己的商店里出售；后者则收购碎布，把它们缝成供奴隶和穷人使用的、也供灭火用的被子。

因此纺纱和织布的方法都没有什么进步。当时普遍使用的可能是由埃及引入的卧式织机；可能是在叙利亚发明并为古典世界通用的竖式织机；还有史前欧洲所特有的加粗经线织机；使用这些织机的织布工仅能织出简单的织物，如梭纹平布、挂

毯、平纹布和纱布。织工不再局限于织羊毛和亚麻了，因为一些新型纤维刺激着更适于它们性能的技术的发展。在印度河流域，人们知道棉花已经几百年了，并以专门的技术纺纱织布。大约在公元前700年，亚述王塞纳赫瑞勃把这种“树上的羊毛”作为珍品引入他的霍尔萨特王宫花园。棉花这时只是一种偶而使用的新纤维；到了希腊化时期，亚历山大大帝及其继承者们直接与印度来往时，人们就更为熟悉这种新纤维了。公元前几世纪棉织物首先在现在的苏丹生产。以后埃及、巴勒斯坦和叙利亚逐渐小规模种植棉花，只是在伊斯兰时代才真正发展起来。直至十八世纪，织工仍很难获得结实的棉经纱，因而他们在织布时使用亚麻经线和棉纬线，这样织成的布按照开罗地区的说法称为“粗斜纹布”。从希腊化时代起廉价的棉花从印度、巴林和苏丹不断输入，但家庭生产的棉织品（称为开巴撒斯）都是棉麻混织，这种织物在古代世界用作船帆、天蓬、窗帘。

虽然在亚里士多德时代已在柯斯岛和希腊及叙利亚的其他地区生产称为“亚述蚕丝”的野丝，但古代人逐渐熟悉真正的中国蚕丝（称为赛利卡）。希腊化时期和罗马帝国时期开始进口蚕丝，在亚历山大里亚和叙利亚中心地区，例如在帕莫拉，往往把它们重织以适合富人的爱好。养蚕业起源于查士丁尼大帝时代，当时修道士把蚕和桑叶放在空心手杖内，从中亚偷运到拜占庭（公元552年），那儿的养蚕业是受严格保护的政府垄断事业。

新式服装和新的纤维需要新技术和新染料。昂贵的紫色染料是从生活在叙利亚和小亚细亚海岸的油螺中提取的。染料的生产常与内地绵羊饲养业相联系，东方帝国的一些城镇努力维护其羊毛和毛织品染色的特殊垄断地位。对染色技术的进一步掌握推动了化学的兴起。适合于各种纤维和新爱好的新织布技术是公元二世纪和三世纪在叙利亚和美索不达米亚发明的。对卧式织布机加上第三道综绕，使之能生产纬纱羊毛斜纹织物。不久以后发明了拉织机，它可将输入的蚕丝重织以符合当地需要。在这些地区，

纺织品的生产走上工业生产阶段比西方早得多。

## 玻璃器皿和窗玻璃

亚述人和埃及人发现了制造有色玻璃的配方，用模子把这种玻璃丝制成各种颜色的小型玻璃容器。到公元一世纪，在叙利亚发明了玻璃吹制法时，玻璃才成为一种十分重要的材料。巧妙地处理金属管端的玻璃泡制成空心玻璃器皿，这种方法为玻璃的应用打开了新局面。各种新形状的玻璃制品的生产价格大大便宜了，大量的玻璃容器、酒杯、长颈瓶开始逐步代替陶制和锡蜡制家庭用具。公元三世纪起，康士坦丁取消了对吹玻璃工人的苛捐杂税后，近东开始大量生产玻璃餐具。这种情况并未使过去的砂芯和模压玻璃技术消失，因为用这些方法生产的玻璃容器仍在香料和化妆品贸易中占很大比例。

在西方，玻璃很早就受到赞赏，公元一世纪，玻璃餐具开始与昂贵的银质酒壶和菜碟相竞争。亚历山大里亚兴建了玻璃厂，叙利亚和犹太的吹玻璃工人在罗马附近定居，意大利在公元前20年开始生产玻璃。玻璃厂经意大利扩展至莱茵河畔和高卢。除了廉价的、自由吹制和用模子吹制的玻璃商品外，各种新型精饰玻璃器皿也开始流行。日益发展的宝石切割技艺促进了玻璃切割技术的应用。玻璃加热时可用工具加工，可以雕刻，或者把抽拉出来的玻璃丝加饰到器皿上（当两者加热时）。

除了用作餐具以外，玻璃还有许多别的用途。在东罗马帝国时代，玻璃镜开始排挤磨光的石镜或青铜镜，开始是不透光的玻璃片，后来做成微凸的八角形，其背面覆盖着铅片。但更为重要的是窗玻璃的生产。早期窗户是用百叶窗或者用席子，或者用格子形陶器或石块，或用大理石、石膏、云母片、鲜鱼泡及油浸羊皮纸挡住。玻璃窗的效果要好得多，虽然最初的窗玻璃最大的不过是1英尺×2英尺。公元二世纪，在富人的别墅里，先在浴室内普遍采用玻璃窗，这在北方诸国尤为流行，因为那儿亟需保护住户

免受严寒之苦。

## 家用技术

奇怪的是，除玻璃窗外，古典工程师们很少注意改进其他的家庭生活条件。当然，古代人大部分时间是在露天生活，但产生光和热的可能性的实现比其他领域的成就要晚得多。古代人用于照明的材料很少：火，火把以及灯草芯蜡烛，涂脂烛芯（一种把灯芯浸在油脂中的原始蜡烛），烧脂肪和油的青铜或陶器油灯。公元三世纪，基督教徒开始使用蜂蜡烛。上述这些光源仅能用以辨别相互紧邻的物体。它们与现代灯的烛光毫无共同之处。因此，日常生活主要依靠阳光。街道由商店里的或透过私人住宅门户的灯光照明。公元450年安提西亚的城镇街道使用路灯以前，所有街道都没有照明。提灯只是油灯的进一步改进，奴隶用它为主人照路，这种灯没有得到进一步的发展，因为要想获得大量灯光代价很高，需要火把底座和烛台以固定许多单个光源，或用青铜环悬挂一系列单独的灯。

与此相同，取暖设备也非常原始。在地中海地区，借屋中央炉床的火堆或炭盒及小火炉帮助渡过少有的十分严寒的日子。当古典文明传播到阿尔卑斯山以北地区时，这些家庭取暖的方法被证明仅能勉强御寒。只是在较大的公共建筑内才找到解决办法。在这种地方可采用集中供暖的“火坑”取暖系统。这是由塞宙斯·奥拉塔在约公元前95年发明的，为他在鲁克林湖滨巴那尔别墅养鱼池和牡蛎池供暖。火炕集中取暖的原理是在空心地板下面燃烧木材或木炭，使热气通过需要加热空间的空心墙。用过的空气可流回该系统内，以使燃烧完全并调节温度。在这个时期末，这种取暖系统原则上应用于阿尔卑斯南部地区的公共浴室，但在高卢、德国和英国，它也被用于巨大的宫殿和兵站，甚至还用于富裕地主的别墅，但较为朴素的房屋则缺乏较好的供暖系统。

这时已可以把冰块收集起来并经远距离运输，贮存于地窖以

供使用，但这种方法只是为少数人服务的。还不可能大规模冷藏饮料和食物，也不懂得冷冻贮藏法。工程师们还设计了一些灵便的加热葡萄酒和食物的容器。用火盆或炭火可使双层陶器或金属容器内的热水循环保持适当的温度，而相似的器皿也能够有效地冷藏饮料。

虽然高卢人已发明一种由煮沸的油脂和天然碱制成的粗制肥皂，但广泛使用的唯一清洁剂是粗碱，它们取自埃及的沉淀物或草木灰，或由某些草或植物熬煮而得。把它涂在身上，再用大量的水冲洗，洗冷水浴或热水浴，这些就是唯一适宜的洗身方法。

小规模地制备如硝石、苛性钠、明矾、醋酸等化学药品已达相当纯度。由于需求量很小，所以未发展成大规模的工业生产。甚至在书写材料方面也只有很小的进步。希腊化时代埃及对纸莎草卷生产的垄断，实际上已被打破。在帕格蒙和其他中心开始生产羊皮纸，这是一种在若干世纪前就已经知道的书写材料。结果出现了新型的书籍，即羊皮纸“抄本”或合订本，它是早期基督文化的特征。即使在古代也已经使用了真正的墨水，一种由在树胶溶液内悬浮的炭黑制成的“中国墨水”，十七世纪以后，才被西方的胆铁墨水所取代。

由上述少数例子足以说明，虽然古代工匠们能生产出许多家用商品，但它们的生产状况在许多世纪内没有很大变化。这是因为小规模的生产对于发明者和革新者的鼓励作用极小，那些有强大推动力（例如国家）所激励与引导的较好生产方法是例外。

# 第五章

# 占星术和炼金术的兴起

大多数科学的起源因为年代过于久远而无法追溯，与此相反，关于占星术和炼金术的兴起，我们至少有某些踪迹可寻，这两者都是在一个确定的历史时期形成的。作为科学史家，无论现在持什么态度，我们不能否认，对于历史上几代人来说，占星术和炼金术无疑是研究天空和物质秘密的科学。

## 前古典时期的占星术

许多世纪以来，占星术是应用天文学的一种形式并且推动着天文学的发展。和希腊的传统说法不一致，占星术不是产生在埃及，而是在美索不达米亚。前面我们已经提到，埃及天文学不象巴比仑那样发达，巴比仑天文学是为支持占星术士的计算而形成的。我们把占星术定义为：从一个人的“算命天宫图”，也就是他诞生时（或297天以前他被怀胎时），太阳、月亮、行星、恒星的位置，来预测他的性格及未来的各种做法。这种占星术已经是相当晚期的发展了，还有一种更为原始的形式，就是“裁决占星术”，可以追溯到早期苏美尔时代。

苏美尔人根据观察贡献给神祇（肠卜僧）的动物肝、肠的外观、熔融的铅注入水中（土地占卜的一种）的形状和许多其它形式的先兆来进行占卜。他们也观察气象和星象，相信月晕、彗星和虹可以

预示收成的前景、瘟疫的迫近、战争及其它情况；简单地说，就是预告人们的家乡和国家最近与将来的情况。他们认为一种先兆预示一种前景，并把这种看法记录在楔形文字泥板上，经常修改和订正。约在公元前1000年，亚述和巴比仑的牧师编纂了一个“占星术现象”的标准系统，波尔希帕（在巴比仑附近）、阿苏尔、卡拉、尼尼微和乌鲁克等五个天文学派都在此系统中增加了自己的说明和注释。大约在公元前600年，这种从天体现象推出的预兆表已经包括了至少70个泥板、约6000—7000个先兆。这就是以赛亚① 在预先警告以色列人时提到的那种占星术：“让那些观天象的、看星宿的、在月朔说预言的，都站出来，救你脱离将要临头的事情”（见旧约全书，以赛亚书第47章13节）。

这种古老形式的占星术是不同形式的算命术的一种，对天文学很少或没有发生影响，而在古代和中世纪仍然流行。爱特鲁利亚人和罗曼人使用类似的方法去决定哪一天是不吉利的日子——这一天将军不宜参加战斗或某件要做的事情不宜开始。画出一个算命天宫图或“生辰占星术”来预示某个人的命运，这种方法不是依据可见现象的观察，而是根据看不见的、据说是自某人诞生以来就存在的恒星和行星与该人之间的联系。

## 新占星术

新占星术要求一种计算某人诞生时刻的恒星与行星相对位置的方法，这位置通常和该人向他求神问卜时候的位置不同。他必须把这些位置划分为“太阳十二宫”——太阳通过天空的视径的十二条想象的等分线。因此，这种形式的占星术，只有在天文学家能够计算行星通过天空的路径和他们赞成把黄道分为黄道带十二宫之后，才有可能。标明黄道带内星座的最古老观察记录的手抄本始自尼布恰得尼查尔王朝时代（公元前568）。在波斯王大流

① 希伯来大预言家。——译者注

士二世统治的第十五年（公元前419），有一个手抄本将天文学计算应用于天宫算命的占卜。但在此之前，星座并未被当作黄道带“十二宫”来使用。在公元前600—400年间，亦即晚期巴比仑和波斯时代，天文学家采用了我们现在熟悉的黄道带，那时他们已经掌握了能够计算天空中行星现在和将来位置的数学工具。新占星术兴起所需要的条件，在公元前6世纪才具备。但以理书提到的僧侣，如魔法师、占星术士、先知和占卜者（旧约，但以理书第5章7节）出现在新占星术诞生以后。这批人很快就有了较高的社会地位，因为我们有充分证据说明，自那时起一个世纪以后，占星术士为希腊知名人物摆弄天宫图来算命占卜。塞硫古时代（公元前300—0），泥板的数目急剧增加了。

这以前不久，在亚述—巴比仑王朝灭亡和波斯帝国兴起之后，希腊化文明拉开了序幕。希腊人来到了美索不达米亚和波斯，并为当地的王朝服务，古老的巴比仑智慧向东方和西方传播。在近东，发生了思想的交流与融合。

占星术从根本上说具有宗教的性质。它把行星看作是具有神性的东西。在埃及和美索不达米亚两地，很早以来，每个行星和恒星都代表一个神祇和精灵。人们也相信这些神圣天体影响着地上的生活，改变着事件的进程。因此，看不见的纽带连接着恒星、行星和地球上有生命和无生命的事物；天上的大宇宙和地上的小宇宙是和谐对应的。通过研究恒星和行星的路程，可以预言地球上事物将来的发展，因为“天上怎样，地下就怎样”！这是古老的巴比仑和波斯信条，波斯圣书的教义又增强了这个观念，这本书宣称，每个活着的人都是从他诞生时的一个恒星上下来的，而且将在死后回到那里听候裁判。这种天上地下之间的类比已经使古代亚述人和巴比仑人去猜测某些神、星、动物、植物、金属和矿物之间的关系。有些古老的手抄本说明，此时这种类比变得

更为重要了。我们现在仍然把精神病叫“路那替克”,① 巴比仑人相信某些动物、行星、石头分别属于某个神及其行星，这种观点对于医学和炼金术有着深刻的影响。

新占星术产生于天文学和占星术的美索不达米亚学派，并由他们传播开来。但是新占星术也产生在波斯的祆教僧中，他们也传播了这种法术。波斯的祆教僧是“上帝的仆役”,他们象旧约全书中利未人一样形成了波斯的最高阶层，他们作长途旅行进行宗教礼拜朝圣，解释圣书及圣书的哲学。祆教僧（魔法师）一词以后用于贬意，一直与“巫师”一词相联系。希腊人引荐从波斯来的哲学家作为先知，不论他们是来自美索不达米亚或是波斯，也不管他们是哲学家还是科学家。

## 希腊和罗马的占星术

在柏拉图以前，迦勒底的占星术和希腊人就已经建立了联系，我们听说一位叙利亚法师预言了苏格拉底的死亡，还听说一个迦勒底人为欧里庇得斯算过命。希腊人运用天象预兆事先告诫农夫和海员，但是他们没有实行这种新占星术。希腊人德谟赛德斯和泰西阿斯带回了这种新占星术理论的某些思想。泰西阿斯认识天文学家欧多克斯，并且大约在公元前 365 年和柏拉图有过来往。虽然欧多克斯否认占星术、否认行星可以影响人类的生活，但到了柏拉图时代，运星（行星）② 神学已被普遍接受。在《共和国》一书中，柏拉图提到巴比仑的天文学信仰，他在《蒂迈欧》一书中记载了“每个灵魂都属于某个恒星”的信条。对于希腊思想的这种深刻影响可以追溯到公元前 260 年，那时巴比仑僧侣和天文学家柏罗苏斯在柯斯岛建立了一个学派，写下了他的著作《巴比仑》。正如狄奥多所说，希腊人从那时起就相信：“他们

---

① Lunatics的音译，原意是受月光影响。——译者注

② 在占星术中行星就是左右人命运的运星。——译者注

（迦勒底先知）主要从星辰的性质和对于星辰的研究来了解人类的秘密，他们不只是对国王预言……所有这些预言都触及真理……他们还事先告诉人们在个人生活中将遇到什么事情”。

并非所有的希腊人都相信占星术。公元前214—219年间，柏拉图学派的领袖卡尔尼德斯指出，人们赋予黄道带行星和十二宫的性质和影响只是一种猜测，从未得到证明。他还指出，双胞胎同时降生但命运不同，并且提出疑问：为什么对动物不用天宫占卜？伊壁鸠鲁主义者和斯多噶主义的某些早期支持者否认这种导致宿命论的占星术。但是，由于希腊人紧紧跟随亚历山大里亚的军队进入了近东地方，希腊文明吸收了更多的东方教义。最后，叙利亚人波赛多尼乌斯（公元前135—51）把占星术和斯多噶学派有关神灵赋予自然以生命力的看法相调和。从那时起，斯多噶主义者和新毕达哥拉斯主义者、新柏拉图主义者一起，成为占星术最有力的宣传者。

晚期希腊化和罗马时代，当希腊和东方学说相混合时，占星术由于吸收了新理论而得到进一步的发展。由于把运星（行星）和恒星的神学与黄道十二宫相类比，黄道十二宫就作为超自然的力量被人所崇拜。承认太阳是“运星之首”的太阳神学逐渐被吸收进来。人的命运完全被星宿所支配的观念，亦即占星宿命论，日渐被人们接受。但是，毕达哥拉斯主义者相信，研究支配宇宙的数字，人就可以达到神圣和不朽的境地，从而避免从星辰预测命运。在真正的希腊精神中，古典占星术试图提出运星（行星）发生影响的规律，也就是：行星的运行过程怎样影响地球，怎样影响环境从而对某种行为有利或不利，怎样影响计算一组恒星和行星的合力（这些恒星和行星的连接、对立和上升改变了每个星的分力）。事实上，这就是有关大宇宙和小宇宙因果关系的支配法则。

占星术从东方经埃及一直传到罗马，亚历山大里亚学院已经研究占星术了。最早的占星术手册是已经佚失的《占星术先兆》，

一般认为此书是尼克普梭和裴托西瑞斯这两个埃及人所撰；另外一些手册则被认为是玛耐托或特瑞斯麦吉斯托斯所写，他们同时也被认为是某些炼金术著作的作者。奥古斯都大帝命玛尼琉斯（公元50）写了最早的拉丁文占星术著作《天文学》。威兰斯所撰的一首更长的说教诗（公元150）和玛特努斯的《数学》（公元335年）也很流行。与此相反，托勒密的较为科学的炼金术手册《四卷书》（公元150），虽然也被占星术士研究但却不被一般公众所了解。西赛罗翻译了梭里的阿拉吐斯的诗作《现象学》（公元前275），把古代希腊人根据气象和星体现象进行占卜的技术介绍给了罗马人。

占星术在罗马很快得到接受。恺撒采用太阳历（公元前46），太阳历以七天为一周而每一天又都献给一个行星，晚期罗马帝国时期官方采纳了太阳神学，所有这些都为占星术铺平了道路。在其它古代文明传到罗马之前，占星术已经在许多罗马人的思想中扎下了根，许多占星术的原理通过他们变成了日耳曼人和罗马帝国版图之外许多部落中流行的信仰。

在罗马，占星术士被称为“数学家”，好几个罗马皇帝曾设法驱逐他们或禁止他们行占卜之术，他们大概是害怕这种占星术而不是怀疑它。早期的基督教会强烈反对占星宿命论，因为这种宿命论导致否认伦理道德的价值。虽然基督教会认为人在上帝的帮助下可以战胜由魔鬼统治的恒星恶势力，但教会从未完全反对星宿的影响。这种对占星术的部分承认，在黑暗的年代有助于天文学研究，因为占星术就是应用天文学。如果不以适当的天文学研究为背景，占星术就没有起码的凭借。

## 炼金术的诞生

导致占星术诞生的环境对于炼金术的兴起也是有利的。考察炼金术是重要的，因为炼金术是现代化学的最早阶段。炼金术士进行实验，描述他所观察到的物质并加以分类，努力从多种多样

的人造和天然化合物中研究元素和元素是怎样化合的。他们讨论这些物质的反应和变化，但由于所处时代环境的局限，他们的结论经常采取哲学的、甚至是宗教的形式，关于这一点我们不再多谈。我们还要指出，这种炼金术是想要了解物质化学性质的高尚努力，因此我们必须尊敬这些现代化学的先驱者，并要设法了解他们的方法怎样转变为现代的方法。

前古典时期的技术已经积累了一大批有关动物、植物和矿物的观察结果，需要把它们加以分类并利用这些知识去生产染料、香料、化妆品、发酵饮料、釉、玻璃和合金等产品。在这些早期的技术和医学的手抄本中，正象我们以后在炼金术手抄本中碰到的情况一样，辛辛苦苦得来的知识经常因为使用神秘和象征性的命名而被掩饰起来。如硫酸被称作是“黑蛇和铜色鹰的血”。冶金术操作的深刻知识导致烤焙试金法和“精炼”坩埚的发明，导致贵金属纯度的试验。然而，人们对贵金属和宝石的疯狂追求，推动工匠去伪造这些东西，已经发现了写有“合成”金、银、铜或青金石处方的泥板。当时人们常常通过在化学溶液中煎煮矿物质或某些植物而制取某些假冒的半贵重宝石。

我们应该知道，在前古典时期，技术操作常常和宗教礼拜仪式及祈祷相伴随。铁匠和玻璃匠融化矿物制取新物质时必须向地神赎罪，因为他们要从地神那里抢来物质用以促成矿石转化为金属、甚至一种金属转化为另一种金属，有时他们相信这是一种自然的过程。他们的操作意味着某些物质的“死亡”或“复活”，和后来的炼金术士一样，他们辨认出了某些物质的“阳”和“阴”的形式。

在第四章里已经讨论过的希腊原子论和物质结构的其它理论是和上述古老信仰相抵触的。那些好奇而想知道物质组成的古代美索不达米亚人，深深地陷入了古代美索不达米亚的宗教和哲学信仰之中，也深深地陷入新占星学之中而不能自拔，他们和波斯的祆教僧也有联系。最早的化学文献以散文诗表现炼金术，并着

意要把这门新科学传授给人类，文献中一再提到佐罗阿斯特及其门徒，也谈到德谟克利特和神话中的埃及圣哲特瑞麦吉斯托斯，甚至吐斯神。

这里，有关化学这门新科学在故乡美索不达米亚的最初孕育过程，很难有踪迹可寻。最早得到研究的几类化学反应包括：将金属埋入粉末状化学药品中（类似于用木炭碳化锻铁的过程）或是在锌矿粉中加热铜以制成黄铜。早期的化学著作中有时将这种过程与把某种金属或化合物暴露在某种物质蒸汽中的所谓“埃及方法”相对照。不久，亚历山大里亚科学院（即博物馆）就开始研究新炼金术。就我们所知，最早的作者是曼德斯地方的鲍洛斯·德谟克利吐斯，他是希腊裔埃及人，生活在公元前200年前后，是新毕达哥拉斯学派的最早领袖之一。他的《物理学》（《自然秘密》）一书共四卷，论述金、银、宝石和紫色颜料的“制造”，其资料是从埃及、巴比仑及波斯的原始资料中收集而来的。波斯魔法师奥斯坦尼斯在此书中曾被提及，他是德谟克利吐斯在化学领域内的老师。

## 亚历山大里亚的化学

当鲍洛斯第一次编纂化学时，美索不达米亚、希腊及其它基本组成成分已经充分地融合在一起了。希腊人的四元素说以一种特殊方式得到应用。亚里士多德和另一些人更强调气、水、土、火这些元素的意义，而不强调元素本身。柏拉图及其他哲学家的著作中有论述基本物质的章节，他们说明这种物质是中性的并且可以通过吸收“性质”（或特征）转变成一种具体元素，这和香膏制造者用无味基质吸收香味浓烈的油素的方法完全相同。对鲍洛斯和赫麦斯派，斯多噶派成员来说，亚里士多德的“性质”可以加在基质之中或从基质抽取出来，这样就愈发具有物质的特点了。在化学反应中，是有可能从元素或物质中分离出“精素”或“灵气”，并把它转变成另外的物质的。炼金术士开始寻找化学

化合物的“灵气”，以便能够按照意愿去改变它们，实现宝石和金属一类物质的“衍变”。

鲍洛斯摘录了染匠的配方手册，其中几种配方保存至今，公元七世纪的一种配方现存柏林博物馆。然而，鲍洛斯对于染色处方本身并无兴趣，他所关心的只是颜色变化。对于他和他的炼金术同行来说，这似乎表明有颜色的物体由于化学反应而发生了根本性变化。化学药品的着色对他们来说意味着发生了真正的“嬗变”，因此他们研究了着色过程，并按照他们相信而且观察到的方式、用染匠的术语表示这类物质变化。在最初的化学中，金属这类化合物的“嬗变”是从把基本物质还原为中性的“土”而开始的。制备这种中性土，是为了能够注入所需数量的“水”（可溶性）、“气”（光泽）和“火”。因此，反应从“黑化”（与硫酸或类似物相混合）开始，接下去是“白化”和“黄化”，最后是“爱奥西斯”（掺入一种紫色），从而能将物质转化成货真价实的金子。

亚里士多德所谓构成物质“形式”的基本性质，到了炼金术士那里就变成了称做“精气”（呼吸）或灵气的稀薄流体。通过持续加热和反复蒸馏，可从任意物质中制取这些流体。因此，亚历山大里亚炼金术士发展了新的化学技术。他们从厨房和化学工艺师那里借用了许多用具，在蒸馏器、封闭容器、蒸煮器和坩锅中蒸馏、煮沸并加热物质，重新制取“灵气”并将其“投放”于所要改变的物质之上，这种物质置放在容器顶部，被“硫磺”、“砷”、“汞”或包含这些元素的复杂化合物的蒸气所“嬗变”。

这种“投放”药剂而改变物质的方法是亚历山大里亚炼金术士的典型方法，他们擅长设计新的仪器去研究物质的性质。在鲍洛斯的《自然秘密》之后约两个世纪，拉里萨的阿那克西罗斯（约公元前五世纪）才写出《着色学》一书，论述物质在改变颜色时发生了什么变化。在公元后最初几个世纪，我们可以发现更多的化学家。实际上，我们可以将实用学派的作者（爱西斯、亚姆布

立克斯、莫赛斯和奥斯坦尼斯）与哲学理论学派的作者（犹太教的玛利亚派、康玛瑞乌斯、赫麦斯和克来奥派脱拉）区分开来，后一学派使用神话名称以提高自己作品的价值。我们只能通过零篇来了解鲍洛斯和阿那克西罗斯的著作，这些篇章可在莱顿和斯德哥尔摩纸草中找到。这些纸草与某些魔术纸草一并在埃及替伯斯墓葬中被人发现，看来是一位早期炼金术士的藏品。纸草书的某些部分摘抄自一本记载实用处方的染匠手册。佐西莫斯在公元300年前后总结了所有关于炼金术的学说和文献，因此，早期炼金术的搜集时期就结束了。他的著作已显示出很强的宗教倾向，他认为可以从金属完全嬗变的伟大奇迹中得到救世。

## 新炼金术士

实际上，我们可将鲍洛斯时代以来的化学分成四个流派。首先是化学技师，他们传授制造有用的化学产品的手艺或“秘诀”，小心翼翼地保守职业秘密，写作不泄露他们手艺的全过程或多半是用秘密语言表述的处方手册。这一类手册的编纂一直延续到拉瓦锡时代。

其次是真正实用的炼金术士，他们相信任何一种物质都能够衍变为另一种物质。由于发明了各种各样的仪器和操作来进行“着色”和“释放精气”，他们对于改进实验技术和发现有用的化学药品贡献很大。叙利亚加扎地方的希腊神学家巴拉欧斯告诉我们，这种类型的炼金术士至迟于公元484年已经形成了被认为具有一定地位和掌握实际操作学问的工匠团体。

佐西莫斯时代以后，第三种化学家变得重要了。他们主要是新柏拉图主义者或诺替斯教徒，炼金术只是他们宗教哲学学说的一部分。这类炼金术士（如斯特芳诺斯及其学派，公元八世纪）不再象第四类理论炼金术士那样热衷于物质的衍变，而第四类炼金术士才是现代化学的真正先驱。“赫麦斯教派的哲学家”，如斯特芳诺斯，把从实验室得到的知识当作象征。他们的兴趣在宗

教领域，他们把炼金术的原文和祈祷、预言、训诫和隐喻混合在一起。他们用隐喻象征的语言来说明化学操作。另外一些人的炼金术操作伴有音乐，以期达到人体、灵魂和天体音乐固有的和谐。

在斯特芳诺斯时代，炼金术研究主要在叙利亚进行，某些著作不是以希腊文而是以亚拉姆文和叙利亚文写作的。赫麦斯教派的哲学家大大地压倒了理论炼金术士并把炼金术转向拯救灵魂。但是，斯特芳诺斯的经验方法没有完全失传，而是在阿拉伯炼金术士那里复活了。拜占庭的炼金术士，如赛洛斯，知道鲍洛斯、德谟克利吐斯和佐西莫斯的名字。但是，拜占庭炼金术士对于炼金术知识的积累贡献很少：他们把自己局限于对已知资料的理论猜测，看来实验炼金术在拜占庭是衰落了。

## 阿拉伯炼金术

在西方，炼金术很少有信徒，炼金术的发展集中在罗马帝国东部。因此，西欧与炼金术没有直接联系。到了十二世纪，当炼金术文献和占星术论文一并从阿拉伯文译本翻译过来时，人们才知道它。

早期亚历山大里亚文献的传播，一部分经由拜占庭炼金术士，另一部分则经由阿拉伯人。阿拉伯人征服地中海南岸后不久，对于希腊文明的各个方面都表现出极大的兴趣。他们将炼金术文献从希腊或叙利亚原文译成阿拉伯文，并进行了仔细研究。在阿拉伯炼金术中，人们将善于思辨的赫麦斯哲学家与亚伯尔·伊本·海扬一类实用炼金术士相提并论。海扬认为，化学物质是按照可量度的关系构成的，因而其具体特性也就是可以量度的，这就播下了定量化学的种子。

阿拉伯炼金术还把中国和印度的思想引入希腊炼金术。他们修改了嬗变理论，因为他们和亚里士多德一样，相信地下的金属和矿物是由“湿”和“干”的蒸气形成的。在多种“灵气”和挥发

性物体之中，那时已经知道了硫和汞，在他们看来，这二者完全体现了这些性质。金属的可塑性和可熔性是由于有“汞”的原因，金属的呼吸和氧化(“生锈”)是由于“硫”的缘故。因此，黄金被认为是富于“汞”而贫于“硫”，硫在铁或其它碱金属中含量很大。在金属上撒一种粉末(希腊人称为“希里昂”)和一种“药”(希腊人称为“帕马康”)，可以促成其嬗变。阿拉伯人称这种药品为“阿尔—伊克西尔”(用我们的话来说就是“精髓”)。制备这种药品要从硃砂开始，也就是从硫和汞的红色化合物入手。

这种“投放药粉”的思想似乎要追溯到中国。关于早期的中国炼金术，我们没有多少证据，看来它是在公元前三世纪独立地兴起的。中国的哲学家早就论述了两个对立面，即“阳”和“阴”。阳是积极的、火性的元素，而阴是消极的、土质的、湿的元素。他们还论述了五行的体系（五行说——水、火、木、金、土）。这种中国炼金术目的在于制取一种保证长寿的物质。黄金也只是用于制造长生不老药剂的杯子，用于炼制“不死仙丹”时制取血色的硃砂，而汞——“有生命的金属”，在这个过程中也起作用。

阿拉伯人采纳了这种思想，他们寻找“万应灵丹”和“普适溶剂”，为的是溶解导致生物体患病和矿物、其它自然物质缺陷的组织和盐类，因此对化学作出了贡献。更加强调理性的化学家，如亚伯尔和拉兹，经常批评这些阿拉伯赫麦斯哲学家。亚伯尔和拉兹努力分析空气、水、火、土的性质以及这些元素在其它化学物质中的缺乏或过盛。他们发展了真正化学知识和实用技术的庞大体系，该体系经拜占庭、意大利和西班牙传到了西欧。

## 中世纪的炼金术

1144年，切斯特的罗伯特把第一本炼金术著作译成拉丁文。更多的炼金术文献急速而源源不断地发掘出来，这些文献说明了希腊—阿拉伯—中国的炼金术理论。不久，西方就对“精髓”、“哲人之石”、“万应灵丹”、“再生”(即植物从其灰烬中复活)、“青

春泉水”、“第五本质”(精气)、“饮用金丹” 和 “万宝妙药” 等字眼儿发生了浓厚的兴趣。

即使是建立在错误的假说之上，但这种积极的实验不久就导致了重要的发现，如生产酒精（十二世纪）、硫酸和硝酸（十三世纪）。这些发明使他们可以提取许多天然产物和矿物，可以在溶液中研究反应的情况，这就扩大了炼金术和化学技师（药剂师）的活动范围。以前他们的蒸馏方法不能在低温状态凝聚蒸馏产物，这就妨碍他们制取低沸点的物品，如酒精。现在他们可将化学药品装在蒸馏器中加热，可以把实验反应限制在熔融状态或液态下来进行分馏，因而也就可以制备溶液和药剂，可以对天然物质中性质活泼的化合物的反应进行更为仔细的研究。西方炼金术士仍然因为使用不纯净的天然物质而受到限制，要确证和重复他们的实验非常困难。尽管如此，他们(如雷蒙德·卢尔,1232—1316)也和前人一样，试图使用某些符号来代表某些化学药品和化学操作。

当时人们渴望分解出最有活力的元素——第五本质，这种热情推动着酸类和酒精研究的继续发展。此后更多的注意力集中到制取酒精上来，因为酒精是天然物质最有效的溶剂，是药剂师手中最有用的工具。在此以前，药剂师由于不能萃取和富集最有活力的元素，一直只是收集和出售天然物质。重新蒸馏纯度为60%的“烈性药水”,可以制得更强的“生命药水”。十四世纪，人们用生石灰重新蒸馏，制得100%的酒精。人们广泛研究了酒精的可还原性、可保存性和可萃取性，并转而应用于实际。

许多中世纪炼金术士从理论思辨转向制备有用的产物，并且写出多卷本的摘要，记载他们的实际经验和处方。这些药剂师和蒸馏匠制备酒精萃取物和蒸馏物并且生产药品。1463年在波多瓦就制备第五本质的正确方法首次进行了公开辩论。1512年，另外一些人在波多瓦和西雅那又进行了讨论。这种活动不仅推动了药物化学开始发展，也是导致以后大量印行“蒸馏手册”的原因。

教会没有反对这种实用及理论性的炼金术。马格努斯（1193—1280）和托马斯·阿奎那（1224/5—1274）被允许用真正而非欺骗的方法来“研究那些被认为是不完善的金属的嬗变。”教会只是谴责那些骗子和“江湖术士”的行径。这些人把炼金术与占星术一起操弄，使用占星术符号代表操作，计算促进“奇迹”发生的星象影响。罗马教谕（1326）和类似的通令，只禁止炼金术骗子，并未禁止诚实地探索化学真理的学者。

## 中世纪的占星术

占星术深深渗入了罗马帝国的文化之中，流行的占星术书籍被西方所继承。与炼金术的情况一样，几个世纪以来这种传统没有中断。虽然托勒密论述占星术的手册《四卷书》直到很晚还完全不为世人所知，但早期中世纪已经知道马可罗比乌斯对西赛罗《西皮欧之梦》一书所做的评注（这本书可以追溯至纪元五世纪），还知道其他一些已经提到的罗马手册。到了十二世纪，许多这类手册从阿拉伯文和希伯来文译成西班牙和西西里文。

教会当然没有正式允许用星辰预测个人的未来。宿命论的信念，即人的行动完全由恒星与行星所决定，是和自由意志学说相冲突的。另一方面，亚里士多德和奥古斯丁统治了早期中世纪的思想，亚里士多德在某些情况下承认星辰可能影响日常的生活。人们相信，自然力从行星和恒星发射出来作用于地球；这种力量对人体有影响，从而也以这种方式对灵魂产生作用。但是，托勒密认为由于人类事先被这些影响所警告，就能够按照这些征兆行事从而避开这种命运。

因此，中世纪神学容忍了占星术的某些方面而禁止了另一些方面。我们不要忘记，那时仍然普遍认为天体是被超自然的智慧所推动的，人们还不相信它们是由和地球一样的元素和化合物组成的，而且从未把它们当作在宇宙中运行的物质球体来讨论。所以他们认为，这些球体发出的自然力量可以影响人体的疾病和缺

陷。“医药占星学”被教会人士所容许，甚至他们自己也讲授它。我们发现了决定开始旅行和进行交易的日期的“择吉”规则，发现了通过恒星找到丢失或被盗财产的办法的“问询”规则。总之，现在依然在某些杂志和日报上印行的这种古代迷信，在中世纪是很猖獗的。

但是教会当局尽全力反对可能导致宿命论的炼金术。马格努斯、阿奎那、格罗塞特斯特(约1175—1253)等第一流的思想家在论述占星术时，没有否认天象影响日常生活，没有否认从星辰可以看出一个人的未来。但是他们认为，由于得到事先警告，人们可以通过自己的自由意志去避免星辰所预示的危险；他们还认为，从星辰去预言人们活动的未来情况是有罪的。

对于占星术的这种颇为暧昧的态度产生了奇怪的后果。法兰西教派的安格里克斯写出了流行一时的百科全书《论属性》，解释地球上的每一件事情怎样受到天体的影响。这部非常流行的著作，在十五世纪不断重印。这本书引用了阿拉伯作家的长篇论述来证明占星术的细节，作者甚至没有想到有必要警告读者去反对占星术所固有的宿命论观点。

罗吉尔·培根（约1210—1293）甚至和阿拉伯占星术士阿尔布玛扎尔一样，认为新的宗教是按照行星的特殊联系产生的。基督教是因水星和木星相连而产生，伊斯兰教是因金星和木星相连而产生。其它宗教，如布拉班特的西格教信仰一种斯多噶主义，认为事件是按周期循环往复发生的，如我们的宇宙是不断产生和不断消逝的，甚至认为基督教也曾经存在和消灭过许多次。这样的理论当然是更为正统的基督徒所不能容忍的，这种思想或许就是罗吉尔·培根被监禁和判刑的原因之一。

占星术由于新天文学的出现而灭亡，但在中世纪，它有助于积累大量的天文观测资料，有助于改进天文学家的仪器工具，正是由于这个原因，它在科学史上占有一定的地位。

# 第六章

# 早期中世纪的科学

## 希腊科学的衰落

目前，我们容易认为科学的正常状况是：一旦开始发展，就将稳步地继续发展下去。每一代后来的研究者都能在比前辈人更高的水平上开始自己的工作，因为他们可以在前辈开辟的道路上继续前进。显然，从来没有任何新研究领域留待开发。

但是，情况并不一定如此简单。至少在古希腊，科学走了一条与此不同的路程：发展到一定水平之后，就开始停顿甚至衰落了。例如，没有一个标志表明，古代天文学曾超过托勒密在公元二世纪所达到的水平；和公元前三世纪的阿基米德所取得的成果比较，理论力学和流体静力学也没有任何进步的征兆；自希罗之后，人们也不知道力学有什么进一步的发展。虽然大家公认，公元三世纪也产生了几位伟大的数学家，比如帕波斯和第欧放达斯；但我们有理由认为这是孤立的现象，并不因此表明数学知识有任何可观的进展。况且以往伟大的数学家（例如阿基米德和阿波罗尼乌斯）的成就，与其说是为新的研究提供了出发点，倒不如说被人们遗忘了。

这些倾向是否可以把它们跟希腊的一般政治文化史联系起来理解，我们不拟涉及这个问题，我们

只注意确实促成了这些倾向的环境：广大人民群众缺乏数学和自然科学基础知识的系统而充分的教育，不象现代社会，这种教育很普遍，不断给这些学科的研究提供新的刺激。

鉴于上述理由，如果说自然科学在希腊不再继续发展；那么，在其他国家，甚至在那些科学后来发展非常繁荣的国家，科学发展的条件也是很不具备的。在公元一世纪，世界上没有一个民族的文化发展到很高的水平，足以使快要熄灭的希腊科学之火继续燃烧并使之旺盛。因此，科学曾一度面临着这样的危险：它在自己发源国里再也找不到栖身之所，其他国家尚未作好接纳它的准备。

以后发生的事件说明这个危机被避免了。科学在西欧找到了新的家园，在希腊已停滞不前的科学在那里继续发展下去。希腊科学是如何到达这个新的家园，那里发生了些什么？这是文明史的一个重大问题。虽然科学发展在空间和时间上有过中断，但在实质方面却非如此，这是千真万确的。在西欧，并没有建立在新基础上的新科学，只是利用了希腊人业已奠定的基础。

在讨论这个问题之前，最好能够了解：随着基督教的产生，一个新的因素出现在历史中，自然科学的发展证明和它密切相关。自然科学和基督教的关系构成了文明史中既复杂又有趣的一章，对此人们并未作过充分深入的或适度的研究，也没有完全理解有关两者关系的各个方面。当然，我们也不得不局限于少数的一般性考虑。

一般可以说，在基督教存在的头几个世纪中，它无助于科学研究。科学因其异教起源而遭到怀疑；而且，当时流行一种思想，认为超过圣经的可能，超过理解圣经所要求的，而过于深究自然界的秘密不适于基督徒的精神幸福。

但是，上述观点不能永久保持下去。作为一个天地创造者的信徒，有义务去认识创造者亲手创造的作品，这种看法自动出现。此外，在解释圣经，尤其是解释《创世纪》中有关创世的内

容时，立即产生了属于科学性质的问题。因此，不同的教父学作者认为，肯定不能把自然科学看成一种从根本上要摒弃的东西。不过，他们一致同意，科学应该永远隶属于圣经的权威，因为圣经的权威远远超越人类精神的一切能力。这样的原则，强加于科学研究，作为必须考虑的一种限制，从而给科学研究带来了数不胜数的困难。

当基督教还在争生存的时候，尽管基督教作家常对异教思想抱有敌意，但各种希腊学说仍产生了巨大的影响。在纪元的头几个世纪中，柏拉图哲学的影响特别大。柏拉图的对话《蒂迈欧》描述了好心的坦缪格建造世界，《创世纪》说明了上帝创世，二者之间存在很密切的关系。柏拉图理念世界的超验性和基督教上帝的观念相协调，而且理念本身也可毫无保留地解释为上帝的思想。基督教和柏拉图主义之间由此建立起来的密切关系，在圣·奥古斯丁（354—430）神学成为基督教占统治地位思想派别的整个时期始终保持，直到十三世纪初。另一个产生了巨大影响（尤其在基督教早期时代）的希腊学派是新柏拉图主义。许多教父学作家都受过这个学说的熏陶。如前所述（原文第41页）这个哲学是以蔑视物质为特征的，所以，它的影响显然对科学无益。

## 希腊科学怎样渗入西方文化

考察希腊人关于自然的思想渗入西欧的途径，我们可以看出为保存希腊科学做出贡献并促进了它的传播的三个文明地区：罗马、拜占庭和伊斯兰。它们的贡献不同，因而其重要性也就决不可相提并论，但在自然科学史中，哪个也不能略而不谈。

罗马。尽管罗马在全世界具有举足轻重的重要性，尽管罗马人在许多方面富有天才，但是，在数学和自然科学研究方面，他们显然没有什么才能，罗马人在这方面的贡献，我们连一项都举不出。然而，他们征服希腊并且和希腊文化接触之后，出现了众所周知的现象：文化较高的被征服民族成为征服者精神上的征服

者。希腊思想成为罗马知识界努力追求的理想，居住希腊认为是教育的必需。

这种精神态度有罗马人的典型癖好为证，这就是编纂百科全书，最大限度地包括和保存希腊知识。这些编纂物一般都没有重要科学意义，但保留和传播文化的功绩不小。在自然科学领域里，特别应该提到的是老普林尼（公元23—79）的《自然史》和路·阿塞涅卡（公元前4—公元65）的《自然问题》。这两本书成为早期中世纪认识古代科学直接的或间接的来源。

罗马学者波埃修斯（约480—524）和卡西奥多斯（约490—580），在西罗马文化彻底崩溃的前夕，产生了较为重大的影响。在那个时期，波埃修斯以其著作《哲学的慰籍》而著名，人们称他为“最后一个罗马人和第一个经院学者”以及“早期中世纪的导师”，简要地表明了他的历史地位。虽然他没有实现提供柏拉图和亚里士多德全部著作拉丁文译本的雄伟计划，但通过他出版的亚里士多德的逻辑论著，以及一些有关数学、几何学、天文学和音乐的著作，西欧才逐渐知晓了希腊科学中的重要基础。卡西奥多拉斯在修道院里建立了动植物园，他在那儿开创了修道士研究科学的传统。他认为研究圣经需要世俗科学实践的准备。在他的著作《论七艺》中，他引入了艺术(文法、修辞、辩论术)和学术（算术、几何学、天文学、音乐）的分类法，并把它们看作为了达到研究圣经这一目的而需要加以研究的课题，这种分类法以三艺和四艺的名词延续下来了。

下面我们列举其它几部拉丁文著作，它们是希腊思想传递到中世纪的工具书。

（i）由恰尔基狄（公元四世纪上半叶）翻译并注释的柏拉图《蒂迈欧》节译本。

(ii) 由阿·泰·马克洛庇斯（约公元400)著的马·杜·西塞罗（公元前106—43）的《西比欧之梦》一书的译注。

(iii) 玛·米·弗·坎培拉（公元五世纪下半叶）著的百科

全书《论文献语言学和诸艺之神[①]的结合》。

拜占庭罗马帝国的东部从未经历过帝国西部所遭受的文化衰落的深重灾难。直到1453年土耳其人征服之前，君士坦丁堡始终保持希腊科学中心的地位。

总的看来，拜占庭学者的保守性大，创造性小。不过，至少在数学上，他们一度起过重大的作用。六世纪初，数学家欧托西乌斯为两位已被忘却了的希腊数学家阿基米德和阿波罗尼乌斯的著作写了注释。除了所注释的阿基米德的三部著作（《论球体和圆柱体》，《圆的测量》，《论平面的平衡》）外，他似乎对阿基米德的其他著作一无所知。如果他没有把阿波罗尼乌斯的《论锥体》的希腊文原版1—4卷保留下来的话，那么，就和后面各卷一样，不能知道这部著作前四卷的原文。在同一时期，圣·索菲亚大教堂的建筑师，特雷利斯的安特米奥斯和米利都的伊西多洛斯似乎在拜占庭建立了一所学校，学习希腊数学，虽然数学在这里没有得到进一步的发展。由于拜占庭学者的积极活动，阿基米德的著作最后差不多全部搜集到这里。阿基米德著作的古抄本以及有关力学和光学著作的手稿，终于来到了诺曼王公们以及他们的后继者西西里和南意大利的霍亨斯图芬家族所创建的文化中心，从这些地方最后到达西欧。

伊斯兰。上面所述传播希腊思想的两条途径的重要性，都不能和第三条途径，即伊斯兰文化相提并论。自七世纪起，巨大的力量驱动着阿拉伯人政治扩张，与此相偕而行的是阿拉伯人吸收被征服国更古老更丰富的文明的惊人能力。

近东是与希腊科学接触的主要地区，传播到这里的基督教带来了希腊和希腊化文化，被驱逐出君士坦丁堡的聂斯托里教派和基督一性教派在这里建立了一些学校。这些学校的神学教育很自

---

① 原文为Mercurg，是罗马神名，掌管手艺、商业、旅行、辩论等，是上帝的信使。——译者

然地导向希腊哲学研究。为使学生学习方便起见，希腊自然哲学的原著，不久还有各门科学的原著，都被译成了叙利亚文。最后，朱迪一撒帕大学（被查士丁尼大帝（483—565）从雅典驱逐出去的异教哲学家，例如亚里士多德注释家辛普里邱（六世纪上半叶）和新柏拉图主义者达马斯丘（约458—533）曾避难于此。）成为希腊文化的保护区，而且约在八、九世纪，成为伊斯兰吸收希腊文化的中心。吸收希腊文化的进程，由于阿巴西德家族的几位大哈里发阿尔·曼苏尔（卒于755年）、哈鲁·阿尔·雷谢德（约765—809）和阿尔·玛姆（786—839）大力促进希腊著作的阿拉伯文翻译事业，而大大地向前推进了。最初多由叙利亚文转译，但在阿尔·玛姆统治时期，在巴格达已有休纳·伊本·伊夏括（809—877）领导的完备的翻译机构，直接从希腊文翻译了大量的著作。起先，兴趣主要集中在医学和物理学著作，但很快就转向天文学、数学和哲学著作。可以很有把握地说，在九世纪末，流传下来的主要希腊哲学和技术文献，已有相当可观的一部分为阿拉伯人所吸取。

希腊文化并不是伊斯兰文化汲取的唯一源泉。伊斯兰人还借取了印度人的成就，以丰富自己的文化，尤其是在数学领域内的成就。这个源泉提供了两次成就，它们非常完整地被现代科学所吸收，以至没有足够历史眼光的人很难意识到它们是极其重要的发现，从而易于低估它们的价值。这就是：第一，书写整数的位置系统，所有的整数都可以用0、1、2、3、4、5、6、7、8和9十个符号表示。（将它与希腊和罗马数字系统比较，可看出所获得的巨大进步。）第二，用正弦作弧的计量单位，而不象希腊人用弦作弧的计量单位。

假如伊斯兰只是吸收和保存希腊和印度知识，它在自然科学发展中的历史意义，已比罗马和拜占庭所做的总和大得多。伊斯兰远远超过罗马和拜占庭之处还在于，许多伊斯兰学者的独立发现丰富了科学。深入探讨这一点，会越出本书的范围；况且，他

们的成就的价值大多属于纯数学领域，在这里不宜讨论。在一大批对科学发展做出贡献的学者中，只需举出两个人的名字：

天文学家阿尔·巴塔尼（约858—929），写过一部重要的天文学教科书，该书直到十六世纪仍享有巨大的权威。他经过精密的天文观察修订了很多天文常量（即岁差常量），发现了托勒密未曾注意到的太阳轨道拱点线的进动。他还将测角术发展到一个更高的水平。

数学家、物理学家和天文学家伊本·阿尔·黑森（约965—1039），他的历史意义主要在于其论光学的巨著。该书在《光学汇编》的题名下，一直到十七世纪，仍在欧洲的物理学界占有重要的地位。他比前人更恰当地（虽然不是完全正确地）描述了眼睛的构造及作用。他的名字始终和一个难题联系在一起，这个难题是，如何决定凸面镜上的一点，从光源发出的光线将从该点反射到一设定的观察者的眼里。他还讨论了晨暮光现象，并想利用它来判断大气层的高度。至于其他阿拉伯作者的名字，下文将相机回顾提及。

十二和十三世纪拉丁基督教吸取阿拉伯有用的智慧和知识宝藏的热情，和当年伊斯兰掌握希腊思想成果的情况相辉映。在与上述拜占庭文化相联系的国家里，两个西西里王国是很重要的接触地区。早在八世纪萨拉森人统治时，阿拉伯的影响已渗入该地区。然而，西班牙的作用甚至更加重要，因为科尔多巴和格拉纳达两省曾是伊斯兰文化的大本营。传播文化的主要中心是托莱多，该地在1085年被基督徒征服后，依然是东方科学的立足之地。这里有一个翻译家学院，他们的译著成为西欧科学的最重要的因素。

叙利亚过去是联结希腊和阿拉伯的纽带，现在阿拉伯成为沟通希腊和拉丁世界的环节。直接由希腊原文翻译由此才成为可能。除了托莱多的翻译家们，其他地方也有人从事翻译。克雷莫纳的盖拉尔特(1114—1187)即是其中之一，归于他名下的阿拉伯

—拉丁文译著有九十二部之多。

## 欧洲科学的起源

科学和哲学经过阿拉伯的或直接的译本如潮水般地涌入西欧，灌溉着这片同时也产生自己果实的土地。果实虽不丰富，但在西罗马帝国灭亡之后的黑暗年代的人们的工作，保持了文化之火长燃不息；火焰虽弱也值得后人感谢。

约于公元600年，西班牙的塞维尔的主教圣·伊西多尔编纂了一套百科全书式的著作《论物性》和《起源》，收编了罗马作者汇编的著作和早期教父作品。八世纪，英国僧侣比德就利用这套百科全书，再加上圣·伊西多尔所不知晓的普林尼的《自然史》一书，写了《论物性》。这本书在以后几个世纪是自然知识的重要源泉。研究神学不忽视世俗科学，这是很早以前就流行于爱尔兰和英国的修道院（克隆纳德、班戈、约拿、威尔蒙斯、耶罗）中的传统；比德的积极活动构成了这个传统的一部分。（他的活动对数学、编年史学和历法计算学来说都很重要。）坎特布雷的圣·彼得学院和约克郡的教团学院也进行了世俗科学的研究。

约克郡教团学院的学生，后来成为该院教师的阿尔昆，于780年应查理曼之聘来到法国，协同致力发展文化。这就是通常所谓加洛林文艺复兴。

哈·英鲁斯（776—856）是阿尔昆的学生，富尔达的僧侣，后来任美因茨的大主教，他在德国也作了类似的工作。由于他在百科全书和启蒙方面所做的大量工作，获得了“第一位德国导师”的荣誉称号。

约在1000年，法国出了一位杰出的人物，奥里亚克的盖尔贝特，后来的教皇西尔维斯特二世*。为了获得来自东方的知识，他

---

* 原文此处为西尔维斯特三世，有误。——译者注

曾在西班牙居住，受益非浅。他独立地进行了数学和天文学的研究。他在兰姆斯学院的积极活动，他后来作为大主教和教皇所具有的权势，都为提高教士们——当时唯一的科研人员——的文化水平做出了贡献。

盖尔贝特开创了一种被描述为以强烈的数学和科学倾向研究古代文化的精神。这种精神在夏尔特尔教堂学院里保存下来。该院在他的学生富尔贝特领导下非常繁荣。

十二世纪，这个学院在夏尔特尔的伯纳德和他的兄弟提利的先后领导下，达到了全盛时期。当时，它是文化生活的中心。几乎所有那时的在自然科学史上有重要地位的作者，都以这种或那种方式和它有联系。例如：

贝斯的阿德拉德。他是英国学者，在十二世纪的头几年云游了法国、南意大利和近东，写了关于哲学和物理学本质的两部著作：《论同一性与多样性》和《自然问题》。在这两本著作里，阿拉伯的影响显而易见。他是把阿拉伯文的著作译成拉丁文的翻译家。欧几里德《几何原本》最早的拉丁文译本归功于他。

康赫斯的威廉（1080—1145）曾为柏拉图的《蒂迈欧》篇作注。他还是《宇宙的哲学》的作者。该书由于提出粒子说而招致神学家的反对。在中世纪，凡带有原子论色彩的东西，不可避免地遭到怀疑，因为原子论经常被认为是伊壁鸠鲁主义，从而被认为是异端。

在亚里士多德主义出现（对此下一章将加以讨论）前夕，柏拉图主义在科学思想中享有至高无上地位的时代，在某种程度上已由阿·德·英苏利（约1128—1202）的工作而告终结。他使用了自然这个概念，因而对我们论述的课题特别重要。自然是上帝的创造物，它受命于上帝并代替上帝照料和引导物质世界的发展。自然统治万物，给万物以规律，是事物背后的构造力量。

自然这个概念和流行于十二世纪的许多概念一样，来源于柏拉图的《蒂迈欧》篇，但它的前程十分远大。这种人格化的自

然，如果不是在严格的自然科学的研究中，至少是在不那么精确的普通口语中，常常转变为绝好的说明：自然准许或禁止万物，有憎有爱。人类要么顺应自然，要么违背它的规律，等等。既然造物主把物质世界的管辖权完全交给了自然，那么自然不可避免地要代替上帝成为人类崇敬的对象。

## 早期中世纪科学的进展

对于自然科学史家来说，仔细地研读上文提及的作者以及这个时期其他许多人的著作，是一件趣事。但是，没有历史知识准备的现代读者接触这些著作，往往容易把它们看成没有多少价值的东西，因为和他学习自然科学所理解的东西相差太远。他不可能把他受到的科学训练一笔勾销，于是，他只看到缺点，而不知道科学达到今天这么高的水平，要克服多少巨大的困难。



对于我们现在论述的时代，有三重困难，它们产生于：

（i）经院学者的一般精神状态；

(ii) 数学水平低下；

(iii) 自然科学的本质。

下面逐一略加论述。

（i）首先，读者应设身处地地体会对传统权威的敬畏情感，中世纪哲学家正是在这种气氛中成长的；读者还应牢记这种情感主宰自然知识领域的严格程度就象它主宰信仰领域一样。在信仰领域，人们毫无批判地接受教会的权威；在自然知识领域，人们对那些由教会裁可的希腊著作的权威的迷信，亦不亚于前者，于是，人们自然会设想：正如在圣经和教父们的注释中，《启示录》是一次写成一样，自然科学的基本内容，在古代伟大的科学家的著作里，已完全确立了。自然科学不被看作一种必须不断重新获取，需要人们继续逐步研究的东西。人们深信它是一种早已存在，或至少是一度存在的东西，问题在于如何才能失而复得。不要被中世纪作家的无数表明所迷惑，他们常常以强烈的言辞，

否认世俗事物的最终决定力量，拒绝诉诸于权威。希腊哲学家具有一种内在的权威，就是那些强烈反对以希腊权威为论据的作家，也深受这些人的哲学影响，和那些最虔诚的信徒一样，采用了这些哲学家所描绘的物质世界的基本特征而很少批判。他们服从他们认为是真理权威的东西。

（ii）数学水平非常低下，是阻碍中世纪产生独立的自然科学的第二个原因。即使当时人们真的从零出发，不受希腊人自然科学成果的束缚，也是这样。这种状况阻碍了定量的物理理论的产生，剥夺了后来证明是必不可少的自然科学的表达手段。有时人们猜测，数学水平的低下也是技术发展上的缺陷（甚至是主要的）。而这又阻碍了物理学的发展。看来数学这个因素也可能没有意义。技术发展到产生镶有彩色玻璃的大教堂的时代，如果需要，就一定可能获得为物理学朝实验方向初步发展所需的简单仪器。

（iii）但是，当时却没有这种需要。这是因为（这就触及到第三个原因，同时也触及问题的根本）人们还没有清楚地认识到，为要达到双重目的——认识自然的内部运动过程，支配由此发现的自然力，应该怎样从事科学活动。这种认识必须通过经验获得。在这方面，自然科学本质上也是经验的。希腊人似已自发地认识到应当怎样研究数学，而所有其他民族又从他们那里学到这一点。但是，他们并没有认识到研究自然科学的真正有效方法。经过好几个世纪，人们才逐步发现这个方法。在现代人看来这是一清二楚的。实际上这种方法是复杂经验（是无意识获得的或有意识进行实验、假设和实验检验得出的推论）的结合，绝不是简单而明显的。自然科学史的重要结果之一就是它教育我们懂得科学方法的价值。

在结束本章讨论的时期的论述之前，有一个事实我们必须注意，这就是：本时期末首次表现了未来欧洲文化史上起巨大作用的力量——大学。它将成为与僧侣政治和行政权力、教权和王权

（后期为教会和国家）并列的第三种力量。虽然直到十三世纪及以后，它才成为一种独立存在的力量；但在十二世纪，两所强有力地主宰和影响中世纪科学研究的大学——牛津大学和巴黎大学已经诞生了。关于它们对自然科学发展的重要性，下一章将详加考察。

# 第七章

# 晚期中世纪的科学

## 亚里士多德主义的兴起

除了前章末提到的大学的建立外，十二世纪末还发生了两个事件：亚里士多德著作知识的普及和两个托钵僧教团——多米尼加教团（1216）和弗兰西斯教团（1223）的成立。这两个事件对文化发展的影响和大学的建立同等重要。

在此之前，人们对亚里士多德并不陌生，但仅仅知道他是位逻辑学家，而且对这一点了解得也不完整。但是，这时他的所有著作，尤其是《形而上学》、《物理学》和《论灵魂》起先经由阿拉伯文转译，不久从希腊文直接译出，并开始发挥了作用。它们给哲学和自然科学开辟了全新的视野。至于那两个教团，尽管原先都是为培养牧师和辩护教义的目的而建立的，但都表现出强烈的精神能力，不把自己单单局限于最初指派给他们的工作。作为受命于神职的研究者，他们很快掌握了两所年轻的大学，循着亚里士多德主义开辟的道路前进。粗略地说，牛津大学成了弗兰西斯派的辖区。巴黎大学则是多米尼加派的领地。

亚里士多德主义对中世纪思想产生巨大影响的原因之一是：继英国的弗兰西斯派僧侣海勒斯的亚历山大（1170/80—1246）和德国多米尼加派僧侣

阿尔柏特·冯·波尔斯泰特（阿尔柏特斯·麦格努斯）（1193或1206/7—1280）之后，意大利的多米尼加派僧侣托马斯·阿奎那（1244/5—1274）创造了一个介于基督教教义和亚里士多德主义之间的体系。结果，这位斯塔吉拉人的学说对一般人生观产生的影响，比它自身所固有的价值产生的效果大得多。这种状况给一般文化史，尤其给自然科学史带来了严重的后果。由此建立的基督教教义和亚里士多德哲学的密切关系，仿佛是给后者所包含的自然学说下了一道宗教的特许令。这就使许多自然学说的研究人员（几乎全部都属于教士团）很难摆脱亚里士多德的影响，并在无数有关信仰和科学的关系问题上纠缠不清。

中世纪基督教世界观吸收亚里士多德主义的过程，并不是一帆风顺的。很多教皇禁止大学研究亚里士多德的思想。托马斯提倡的观点（亚里士多德主义能够给基督教神学提供真正的哲学基础），直到十三世纪末才战胜其他的观点。1323年宣告托马斯为圣徒，标志着他的观点得到官方的承认。

表面看来以柏拉图主义（以基督教的形式留存在奥古斯丁神学中）作为基督教教义的哲学基础，要比亚里士多德主义强得多。亚里士多德主义关于世界在过去和将来都是永恒的学说，意味着彻底地否定了基督教教义的而不是亚里士多德主义的哲学基础。经阿拉伯哲学家伊本·路希德·阿威罗伊(1126—1198)讲解的亚里士多德主义认为，所有的精神生活都是那包罗全部个人理智的唯一理智的表现，从而否认了个人对行动应负的责任，这和基督教个体不朽和个人有责任的思想是冲突的。托马斯认识到，尽管存在有异议的因素，亚里士多德主义在基督教神学中仍可起到他所指定的作用。托马斯一定知道要让他的同时代人相信这一点，是非常困难的。到托马斯死后数年，即1277年，奥古斯丁派反对托马斯主义的思想在巴黎主教艾蒂安·唐波尔（十三世纪下半叶）颁发的著名教令中鲜明地表现出来。教令谴责3219个哲学和科学的观点，其中有20个是托马斯公开倡导的。不过，这位主

教多少是以个人意愿行事，教会并没有肯定他的判决，于1325年撤销了这个教令。尽管如此，作为基督教反对亚里士多德主义的标志，它仍具有重大的历史意义。一个重要的例子是谴责认为上帝做不到某些事情的观点。(上帝不能使整个天宇作直线运动，因为要是如此，就会留下虚空。而根据亚里士多德，这是不可能的。）源于亚里士多德哲学的对全能上帝的限制，触怒了反对派。

关于唐波尔教令的真正历史重要性，众说纷纭。有人认为它不过是一场神学家内部的斗争，对科学无关紧要；有人认为它是神学家约束科学思想趋势的征兆；还有人在一定程度上把它看作近代科学的开端，因为它从原则上否定了亚里士多德哲学的支配地位，给学者们考虑其他思想可能性的自由。当然，很难判定哪种观点最接近真理。最有启发的结论也许是，甚至在1200年以后（在此之前，当然不成问题）中世纪的思想就不再奴隶般地屈服于亚里士多德了（现在仍有这种看法）。这个结论得到许多其他观察资料的支持。中世纪的大学（尤其在十三、四世纪）的特征是各种科学思想的交流极其活跃，考察了许多不同的观点，其中包括对亚里士多德思想的批判和必要的否定。无可否认，所有这一切经常不过是任意地为争论而争论；在世俗事物、在科学事物上诉诸人类权威原则上仍然一再被否认，在科学问题上运用神学的论据也受到指责。

亚里士多德关于自然的思想最终能占统治地位，首先是因为它自身具有令人信服的力量。应该牢牢记住，中世纪思想家并没有开创科学研究。体现了科学理论的既成希腊哲学体系传给了他们。其中之一的亚里士多德主义，不但和神学密切关联，而且还特别令人信服，因为它是包罗全部世俗知识领域的系统结构，因为它对物理现象和天文现象的论断，与那些来自公正观察和常识的明显看法特别一致。这难免使人产生一种印象：自然的真理，可以在这里发现。如果考虑到希腊智慧在中世纪所受到的普遍敬重（这本身是值得注意的，因为它建立在异教的思想基础上）和

当时盛行的轻信风气，那么，亚里士多德的权威至高无上，甚至对那些从细节批判它的人来说也是如此，就不足为奇了。

到十五和十六世纪，经院思想僵化成一种传统和成规。这种基于内部原因的接受，确实往往变为对公认权威的正式屈从。这时，亚里士多德主义才真正成为难以忍受的桎梏。而流行的见解认为，从一开始就是这样并直接引起一切致力于自然思想革新的人们常有的敌对情绪。但是在十三、四世纪，所有这些问题是不存在的。

唯一可以希望的是，十三世纪的亚里士多德自然观思潮取代流行于十二世纪的柏拉图的自然观，会刺激自然科学的发展，因为从根本上说，亚里士多德重视经验远远超过柏拉图。按照柏拉图的思想，我们周围世界的感性事物不过是超验世界的真正实在的不完满的摹本；而根据亚里士多德的思想，感性事物自身就是自然科学应研究的实在。关于这些实在的真知只能从感性知觉中获得：存在于思想中的东西，无一不首先存在于感性之中。

在中世纪，对由此产生的问题展开了大量的争论。有人在普遍概念里寻找真正的实在，反对这个看法的人则认为真正实在只存在于个别具体事物之中，普遍概念仅仅是名称而已。后者因为其力主观点的特征而得名唯名论。那些持有唯名论观点或相关观点的思想家对科学研究都产生了有益的影响，这不奇怪。唯名论首先注重的是通过感观而获得的关于具体事物的经验。与它相对立的名为柏拉图的实在论（这是一个混乱的名称，因为它认为实在位于观念之中，所以也可称作唯心主义），它始终诱惑人们去作先验的冥想。

另一方面，过度地强调概念的唯名性显然也会陷入纯粹的经验主义的危险，经验主义只罗列事实而不把它们概念化和理论化。自然科学直到学会把柏拉图主义和亚里士多德主义调和一致时，才成其为自然科学。

对中世纪科学状况作了上述一般性考察之后，我们将讨论几

位学者和一些专题，但不能说论述完备。在十三世纪，我们所注意的首先是罗伯特、格罗塞特及其学派。

罗伯特、格罗塞特（约1175—1253）是牛津大学第一任校长，弗兰西斯派僧侣的教师，后任林肯郡的主教。他组织了牛津大学的教学，为研究希腊辩护，论证了把自然科学建立在数学基础上的必要性，这些作为使他在英国及其他地方都产生了有益的影响。现在他格外引人注意，因为他关于科学方法的观点是现在通常叫作假设-演绎推理方法的第一个纲要。这就是：在经验基础上提出假设，然后对由此推出的结论用经验证实或证伪。尤其值得提出的是他明确地表述了证伪原则，如果从一个假设中导出的结论和经验不符，则该假设应予摒弃。

此外，格罗塞特的重要还由于他的“光的形而上学”理论，它认为光是自然界中最高的实在。感性事物是由光和原生物质的组合而产生。每一组成部分本身不占有空间，但当两者结合在一起时，可见的宇宙就通过它们的三维扩展而被创造出来了，吹肥皂泡可证明这一点。

在光的传播中可以找到理解物理力全部作用的关键。因为光的传播是一种作用的任何延伸的原型。这种延伸可用数学形式表达。在这个问题上，格罗塞特的观点和近代物理学中场的概念很相近，但他所掌握的数学工具根本不足以从中推导出任何有价值的确定结果。

毫无疑问，光的形而上学的产生和十三世纪许多学者对光抱有巨大的兴趣有关。格罗塞特所研究的问题之一是解释虹的成因，这在古代就已引起人们的注意，根据证伪原则，他摒弃了当时存在的种种无视光线在空气、云和雾连续层中的折射现象而想解决问题的企图。格罗塞特本人对光的折射现象的研究，无论如何是超出了模模糊糊的水平。

在以往编纂的中世纪史中，一定会提到格罗塞特的门徒弗兰西斯派的僧侣罗吉尔·培根（约1210—1293）而不一定会提格罗

塞特，罗吉尔·培根是他的信徒。长期以来，人们习惯于把培根看成改革自然科学的先驱、远远走在时代的前面而得不到别人理解的人物。人们特别看重的是，他预见了许多在我们的时代确已成为现实的技术成就，例如：望远镜、汽车和飞机。而且，他为科学实验的热情辩护，其中包含对当时的经院哲学的猛烈抨击，也给人们留下了深刻的印象。他所属的弗兰西斯教团强加于他的长期监禁，更使人们尊他为科学的殉道者。

这些评价从未得到证明。细加考察，就会发现培根不过是他的时代的产儿。对于那种根本不打算把提出的远景付诸于现实的异想天开，不能评价很高。培根科学实验的真正含意不太清楚，可能和现在所谓的实验科学的意义大不相同。他被剥夺了自由的原因也不很清楚，但把这看作是对自然科学研究的敌意的表现，难以说通。还有，他猛烈地批判了几乎所有的同时代人，但实质上不能得出他走在所有同时代人前面的结论。无庸置疑，在中世纪思想史上，培根仍然是一个重要而有意义的人物，但这与其说是他改革了中世纪思想，倒不如说他解释了它的缘故。

格罗塞特开始的光学研究，也引起了培根的兴趣。他的光学著述部分取自格罗塞特，但他还知道一部来源于阿拉伯的统治了中世纪光学研究的重要著作：阿尔黑森的《光学汇编》（参看原文第107页），而格罗塞特未能利用这部著作。

这部《汇编》也是自1279年任英国弗兰西斯派的主教和坎特布雷的大主教的约翰·皮坎姆写作《全透视》一书时的丰富资料来源；还是波兰僧侣威特罗（十三世纪）的《光学》和德国多米尼加派僧侣弗莱伯格的第里希（约1250—1310）的三部光学著作的资料来源。印刷术发明之后，皮坎姆和威特罗的著作出版，直到十七世纪还在使用。

这三位学者自然也都探讨了虹的问题。第里希的解释进展最大。他认为，水珠内的光线在水珠壁上依次发生折射、反射，然后再发生折射。他还清楚地知道副虹的成因。当然，在解释虹的

颜色问题时，他和任何其他古代或中世纪的学者一样困惑不解。

眼镜，可能是在十三世纪出现的，以后成为科学发展中非常重要的因素之一。最早的眼镜是供远视者用的，然后才有供近视者用的眼镜。这完全是一项实用的发明，很长时期，光学科学根本不理会它。这和科学家对所有光学仪器持普遍怀疑相一致。当时公认视力观察使人学得真理，但无论人们相信视力由眼睛发出的光线构成，还是由射向眼睛的光线或形象的光路构成（参看原文第61页），它都是直线的。而反射或折射改变了光的线路，因此人们担心借助仪器看到的不是物自身，而是幻象。

如果说我们对中世纪物理学的论述好象是由一系列各不相干的段落拼凑起来的，那么，这不过是我们对这个课题的知识残缺不全的必然结果。随着新的手稿的发现，这方面的知识不断增多。因此，最近我们才从十三世纪的比利时经验学者布鲁塞尔的盖拉尔特的《论运动》一书中，知道他对动力学的某些研究。他似乎利用了阿基米德的《圆的测量》（可能是克雷莫纳的盖拉尔特的译本）和一部好几位中世纪著作者都知道的丁奈姆的约翰内斯的著作。这部著作是在阿基米德的《论球体和圆柱》的基础上写成的。因而证明，在这个时期希腊数学的普及程度比我们以往所能相信的要高得多。我们在这里不拟讨论《论运动》的内容。

现在谈谈皮埃尔·德·马利考特（或波列哥雷努斯，约1250年）也许最为合适。他可能就是罗吉尔·培根誉为熟练的实验家那样的学者。我们有一本他在1269年写的有关系统实验的著作《磁学初步》，它论述了磁的基本现象（吸铁、南北极的区别及两者的相互作用力，铁棒越过磁铁后的磁化，磁感应，以及如指南针之类的用途）。值得一提的还有球形磁极，即后来威廉·吉尔伯特（1544—1603）使用的磁化小铁球。

磁石吸铁这个奇特的现象，在整个中世纪一直促使人们努力去解释它。最一般的理论是：磁石在铁内激起了一种属性，这种属性力求与磁石相结合，为此目的，在每一场合激发位置运动。

现代读者也许倾向于把这种理论看作仅仅是用一种复杂的词句描述现象，但什么也没有解释。他是完全正确的。但是假如他认识到，磁石吸铁这种更为熟悉的说法不过描述了人们所见的现象，也是什么都没有解释那就好了。

今天的读者阅读中世纪关于重物降落的起因和持续原因的理论，也将抱怨它的冗词赘语。这些原因追溯到：(i)物体之内，或(ii)物体之外。前一种情形又取决于：(ia)朝一特殊地点（即地心）的趋向。(ib)朝一物体（所有重物的集合体）的趋向。根据(ia)，重物只落到地面上，因为地球包含着地心；根据(ib)，发生这种现象是因为地面是“地球的一部分”。

根据后一种情形，重物落地是因为：

(iia) 地心的吸力，或

(iib) 月球的斥力，或

(iic) 分布于地面空间且指向地心的力所发出的冲力。

假设(iia)和(iib)因为需要超距作用而遭到严厉的责难。

## 梅登学院派

牛津大学的梅登学院派是一个杰出的中世纪经院学者团体。一般认为中世纪物理学和近代物理学有最显著的区别，前者纯粹是定性的，而后者则主要是定量的。虽然这种区分大致正确，但也不应过分拘泥于此；因为十四世纪已有人完全认识到质和量各自的特殊本质，努力对性质作定量的研究。这种努力和当时大量讨论的一个问题有关，即如何解释性质强度的增加或减少（物体可以是比较热或不大热，表面能照得比较亮或不大亮，一个人能有较多的或较少的人性）。首先，经受强度变化的究竟是什么，是性质本身呢？或是所思考的客体的性质产生一定程度的变化，而这种性质本身可视作永恒不变的？还是原有的性质消失而为其它性质取代？其次，程度上的变化是否可看作同一类性质的增加或减少？若是如此，新增加的性质怎样和原有的性质混合？

十四世纪梅登学院的学者们习惯于用一个数字或一个字母来表示某种程度，起先采用缩写，后来也成为一种量的标志（即所谓极限表示法）。并用这些符号进行运算。强度和符号之间的确切关系很难引起人们的重视，而且，这种方法还随意运用于那些根本不能计算的性质（如爱）或当时还不能计量的性质（如热）。

由此造成的处理性质强度的方法，被命名为“计算法”。它在科学史上具有特殊的重要性，因为变速运动的瞬时速度也被列入可变的性质之中。这就导致人们研究速度变化的种种可能性，其中最简单的是速度随时间有规律地增加或减小，因此有了匀变速运动概念，这个概念成为力学中十分重要的概念。

从事“计算法”研究的学者有：托马斯·布莱德瓦尔丁（死于1349年，当时是坎特布雷大主教）；西斯特僧侣里查德·斯温斯海德或休斯特（十四世纪上半叶），中世纪晚期人们根据他的一本著作的名称，通常称他为“计算家”；还有威廉·海特斯布雷（1371年任牛津大学名誉校长）。三个人都来自梅登学院。

关于他们著作的本身价值无一共同看法，此处不拟深入讨论这个问题，但仍举两个例子。

布莱德尔瓦丁试图以公式表示使物体运动的作用力和由此产生的速度之间的关系，这种速度与来自逍遥学派的动力学基础规律的公认解释不一致（参看原文第39页）。如果把他的推论用现代数学语言表达出来，即$V=C\text{tog}\frac{F}{R}$（我们这样做是问心有愧的，这种表达在年代上犯的错误，甚至比把基础规律写成$V=C\frac{F}{R}$还要严重）。

这个公式表明：要使速度增加2倍，3倍……，就必须使作用力和阻力之比按2次方，3次方……增加。它同时还证明，除非F＞R，否则即无运动。

这是一个极其出色的思想，但也不宜过高地估计它的价值。它

之所以出色，是因为它是人们独立于亚里士多德的一个鲜明的标志，还因为它反映出人们更自由地考虑函数关系了（从此之后，人们只考虑正比例或反比例的关系）。当然，上述关系完全未被建立；所作出的论证无一是以经验为基础提出来的，而且最糟糕的是，论证是错误的。

至于"计算家"，我们仅举出一例，即他对运动的研究，得出了无限数列总和的公式：$\frac{1}{2}+\frac{2}{4}+\frac{3}{8}\cdots\cdots\frac{n}{2n}\cdots\cdots+\cdots\cdots=2$。

## 巴黎唯名论者

另一个值得注意的学派是巴黎唯名论学派。它是十四世纪与巴黎大学相联的学者集团。这个集团的重要意义一方面由于它的一个成员对计算法做出了重要贡献，另一方面因为它改造了引入的亚里士多德动力学。先讨论后一点，因为它是整个集团的共同特征。

我们已经指出，古代注释家菲罗波诺斯已持有一种和公认的牵强附会的亚里士多德理论相反的观点。亚里士多德认为，被抛射体一旦脱离抛射者，就凭借它周围空气的作用而保持运动。与此不同，菲罗波诺斯设想在抛射时有一种内在的运动力压入抛射体，而后对物体起驱动力的作用。内在的运动力在不同的十三世纪作者那里有不同的名称。巴黎唯名论者在冲力的名下，一致接受了这个观点，并以此为基础创立了中世纪最杰出的科学理论之一。

巴黎大学教授、可以看作巴黎唯名论学派的核心人物让·布里丹（约1300—1385）在一部论亚里士多德《物理学》的著作里，详尽而明确地反驳了亚里士多德对抛射运动的解释。并指出冲力理论对所讨论的一切现象的解释，远不象前者那样曲折。冲力理论也解释了物体下落速度按常数递增的问题：起先引起物体下落的只有重力，这样就把冲力给予物体，这时，冲力也是一

种能引起下落的附加重力，于是，运动越来越快，冲力也越来越大。所以，物体受恒定的重力和增加着的冲力而运动。恒定的重力产生递增的速度这个事实向来是个谜，现在可以理解了。

布里丹还把冲力原理应用到天球运动中去，这是很了不起的。上帝在创世之初给天球以转动的冲力，只要没有任何外来的阻力，它们就会永远旋转不已，于是，就不必假定每一个天球都须接受一个理智来保持它的运动了。布里丹背离了公认的亚里士多德原则，把源于世俗自然科学的思想应用到天体现象，从而原则上取消了天地之间的根本区别。

用现代术语来表示冲力的确切含义当然是很困难的。事实上它根本就没有确切的含义。然而，它虽是一个模糊的概念，但蕴含着后来确切概念的萌芽。它的含义有点类似惯性，有点类似动量，还有点类似动能。从布里丹的著作来看，最易于把它认作动量，从而设想它是由质量和速度的乘积决定的。

冲力理论得到另外三位著名唯名论者的拥护、保卫和发挥。他们是：法国人尼古拉·奥里斯姆、德国人萨克森的阿尔伯特和荷兰人马兹利乌斯·凡·英恩。这里只讨论奥里斯姆。另外两人有特别重要的历史意义，因为他们都是德国刚刚创立的大学的校长（阿尔伯特1366年在维也纳，马兹利乌斯1386年在海德尔堡），从而把唯名论的思想传播到那里。阿尔伯特曾试图提出一个表示落体下降时速度增加规律的公式。他认为速度增加和下落距离成比例。这是一个后人常常捍卫的思想。

尼古拉·奥里斯姆，在巴黎大学和教会担任高级职务，死于1382年，当时任里修克斯主教。他在自然科学史上的重要地位主要是由于他运用了图解法来阐释性质强度变化的理论。虽然不能肯定他是这个对科学极有用的方法的发明者，但至少不知道谁比他运用更早。肯定可以归功于他的是他推广了这个方法，并把它运用到一个重要的问题，即匀变速运动中去。他设瞬时速度为纵座标，时间为横座标而得图10。他显然已知由此所得的梯形面积

代表所通过的距离。因为该梯形面积和以相同横座标值与以中央纵座标值为恒定纵座标而构成的长方形面积相等，他阐述了这样一个命题，即匀变速运动在一定时间内通过的距离，和在同样时间内以等于变速运动在所考察期间的中点的瞬时速度所作的匀速运动通过的距离相等。

直到最近这个命题仍被誉为伽利略对力学的主要贡献之一。可是，它至少在伽利略以前三个世纪就被发现了。可以有把握设想，牛津的计算家们已知道它，但没有任何征象表明他们已象奥里斯姆那样用几何图形作图解表示。

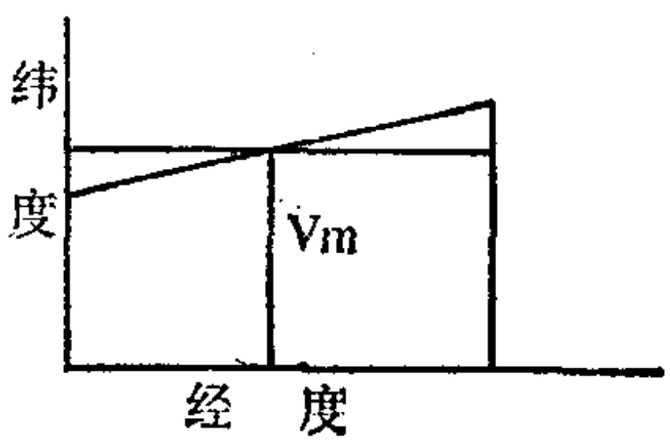


图10

法国科学史家皮埃尔·杜恒在《达·芬奇研究》(1909—1913)一书中首次证明了巴黎唯名论者的功绩，从新的观点考察中世纪自然科学。以后有些作者把奥里斯姆和他的集团成员们称为伽利略的先驱者，并把上述匀变速规律称作奥里斯姆定律。这种命名对于梅登学院的科学家是不公正的，所以我们现在一般称梅登定律。

十四世纪牛津和巴黎的科学家们的卓越贡献使人发问：为什么新物理学不在十四世纪，而在十七世纪诞生呢？一般说来，讨论假如历史走另一条道路将会如何是无聊的。在此我们必须牢记，被某些人所称作的“科学革命”要求整个思想倾向发生根本性的变化，而这是十四世纪的经院学者们远远没有达到的。

虽然奥里斯姆也许已发现了匀变速运动理论的一个命题（后来伽利略发展了这个理论），但他自己的确未能在这个结果上发展它。首先，数学的发展水平太低了。再者，没有任何标志表明他知道自己作纯粹运动学研究的匀变速运动，实际上就是自由落体这个重要的自然现象。他的理论根本没有任何物理应用价值。

另一方面，到中世纪晚期，人们确实知道自然界中的匀变速

运动了。在西班牙多米尼加的弗兰西斯僧侣（作为弗兰西斯教团成员的多米尼加僧侣）索托（1494—1560）著的亚里士多德《物理学》的注释中，可以找到最早的证据。他谈论自然界中的匀变速运动的方式表明这个事实是众所周知的。

对十四世纪牛津和巴黎的学者们的不朽业绩和思想进展作一历史的探讨，也许是有重大意义的。一直有人猜测，十五和十六世纪的帕多瓦大学成了那个时代和伽利略时代的中间环节。可以引很多论据来证明这一点，但不能说问题得到了彻底的解决。

## 约丹纳学派

有一组静力学论文，其中最重要的是数学家约丹纳（约1200年）的论文。它们和上述任何著作均无直接关系。约丹纳的身份及著作权仍是悬案，所以我们谨慎为是，只讲约丹纳学派。

这些论述静力学的著作，通常是作为中世纪版欧几里德论文的一部分问世的。实际上它们完全可能是希腊力学的直接延续，而且在某些问题上，甚至发展了希腊力学。于是，在这些著作里我们发现了力对一个点的静力矩的概念，借助这个概念，直角杠杆理论得到发展。

约丹纳学派最重要的成果是斜面定律的推导，见于《约丹纳论重量平衡》一书。如前所述（原文第58页），古希腊力学学者未能成功地建立这个定律。这样，我们就有了中世纪科学成功地填补了希腊科学空白的第二个例子（另一个是梅登定律）。

约丹纳的推导过程证明是受了亚里士多德杠杆定律（原文第56页）的启发。这项推导以两个物体同时虚位移的讨论为基础，而这两个物体通过安放在两个角度不同的斜面上的一条绳子和一个滑轮互相保持平衡。它还以一个普通的原理（后来人们有时称之为约丹纳原理）为基础。这个原理是：能把某一重物G上升到h高度者，也将能把重物nG上升到$\frac{h}{n}$的高度。

# 第八章

# 中世纪的技术和工程

虽然在古典技术传统和中世纪实践之间并不存在割裂状况，但中世纪艺术和技艺的文字证明材料相当缺乏，尤其是在它的早期。我们只掌握这样一些文献：八世纪的《炼金秘诀》和《论莫柴斯的着色》、赫拉克利斯的《论罗马的绘图和艺术》（主要是十世纪）及十二世纪的柴奥菲鲁斯关于各种艺术的随笔。但这些著作主要讨论用于建筑和教堂装饰的艺术和技艺。我们有一本弗拉德·德·霍纳考特（1245）的画有许多机器的素描本，还有见于其他文献中的一些片断。但对于十五世纪前有关工程技术方面的知识，我们必须根据少数保留至今的中世纪工程和幸存的彩色玻璃窗上的绘画或有插图的手稿加以推演，而十五世纪以后的许多手册则尚未逸失。

## 原动机，水磨和风车

如果说中世纪的技术深深扎根于古典传统，那么它在一个重要方面的区别是，在驱动机器和工具时，采用原动机代替肌肉的能量。由于罗马帝国的衰亡及随后动荡年代的到来，在三和四世纪采用水磨的趋势受阻于萌芽时期。哥特人、旺达尔人、朗巴达人、法兰克人和其他部落的大迁徙对于欧洲未来的危害，或许还次于公元八世纪和九世纪时穆斯

林和斯堪的那维亚人的入侵。但从那以后，欧洲得到了恢复并得以重整旗鼓。

长期来已经证明，奴隶制度既是一种不经济的生产方式，也难以胜任优质的商品生产。基督教的博爱精神，它对手工劳动的固有的尊重以及对奴隶制的谴责，强烈地刺激着人们去利用水力和风力。因而当政治和社会条件变得更为有利时，西欧的水磨数量大为增加。《末日裁判书》① 中提到，在1086年英国的水磨数量不少于5,624台，此数较一世纪前少100台。从中欧和法国的文献中也可以看到相似的情景。在十至十二世纪，显示出有一次“工业革命”，它堪与十八和十九世纪的工业革命相媲美。与此同时，许多新式城市兴起，在那里，很多技艺开始了机械化。

水磨最先用于把谷物碾成粉，以后很快又转向其他用途，如提水、压榨油籽、麦芽制作、磨碎赭石和其他染料、漂洗、造纸、鞣料生产，它们还用以驱动诸如锤、锯、磨石和车床等工具，这是一种到1300年实际上已经完成的演变。修道院的教会团体，如西斯特教团② 的教士们，那些荒芜贫瘠土地的辛勤开拓者在推广水磨使用方面有突出作用。在法国和意大利，甚至企图利用潮汐的能量，但没有取得许多成就。

西欧的地理条件使那里有经常可供利用的溪流和河道的流水，因而促进了水磨的这种演变。公元537年，哥特人包围罗马并切断水渠，伯利塞鲁斯将军发明了浮动磨，即把水磨机械放在一条驳船上，这种船可浮在河面且与水位高低关系不大。这样的浮动磨在中世纪的欧洲也很普遍，几乎每一大城镇的大桥拱下都有，其中少数甚至还保存至今日。

另一种原动机风车，成为西北欧低洼有风海岸地区的特征。通常传说风车是由十字军参加者带到欧洲的。但东方的风车（它

---

① 末日裁判书Domesday Book，是征服者威廉颁布的土地丈量清册。——译者注

② 西斯特教团是1098年在西斯特地方创立的僧侣团体。——译者注

的产生至迟在七世纪），有一根竖轴，它由安装在露于轴外的两套水平幅条间的一周风帆带动旋转。运用风能的思想可能来自东方，但看来西方的风车更象是来源于水磨，它具有十分相似的由水平轴带动的机构，此轴由一组竖帆推动。在大西洋和地中海沿岸一带，这类风车经常具有八至十二张帆，但比利牛斯山北部和北海及波罗的海沿岸地区，仅从十二世纪起才建造四帆风车。

最古老的风车是一种固定的结构，称为柱状风车；以后建造了塔状风车，其冠或顶部是可以转动的，以使风帆对准风向。第一批风车几乎全是谷物磨，但到十五世纪，它们开始被用作为原动机，并且在难以利用流水的滨海地区，逐步起到与水磨相同的作用。从十五世纪中叶起，低洼国家用水车排水。

不应忘记的是，在许多场合，机械仍由人或牲畜操作的踏车带动。直到十八世纪，在矿山和棉花加工厂仍可发现这类踏车，甚至在更晚些时候，德国的钻机仍由马力驱动，因为移动式蒸汽机价格太高，而且也很笨重。

## 马力的灵活运用

古典时代对于充分运用牲畜的牵引能力关注甚少。古代处置不当的胸带和肚带勒迫马匹的气管。水平胸带可能是草原的人们引入欧洲的，以后缓慢地为人们所赏识。随着以一对轴代替有轮车的单独一根牵拉辕杆，产生了一系列重大变革：从十世纪起，废除肚带，研制了垫肩马轭。

罗马人和凯尔特人已知道各种形状的马掌（如其中一种马掌只起暂时性保护作用），但只是从中世纪的十世纪起，才普遍使用。马掌能保护马蹄，使马蹄更好地抓牢地面，从而大大提高马匹的效能。

由于东西方之间的相互影响，骑马术也开始获得更为充分的发展。公元四世纪古罗马的鞍座逐步取代更古老的马衣，而前者本身受东方的影响变成真正的骑座。公元八世纪，斯堪的那维亚

骑手从几世纪前入侵欧洲的东方草原牧民那儿学会运用马镫。靴刺和马嚼是欧洲人的发明，到中世纪，它们的应用更为普遍。

这些变革必然产生巨大效果：不仅把乘骑的马匹变成更有效的战争和旅行工具，而且它在农业中作为牵引牲畜的重要性大为提高。马匹开始取代在整个中世纪作为“农民的发动机”的牛，而且产生了三倍或四倍于古代马具所能发挥的牵引力。

## 农业革命

上述变革对中世纪所发生的农业革命起了一定的作用。在西欧仍采用着各种不同的较古老的耕地方法，它们更适合于北方的土壤和气候。古典的耕地方法证明是不适用的，而北方的具有犁刀、横铧和模板的轮犁则开始普遍使用。即使当地的排水不理想，这种犁仍然可能在肥沃的河底厚土层中进行耕作。它开始了典型的北方土地分割带状种植制，因为当时无需交叉耕作。

这种新犁需要较大的动力。在用马匹拉犁前很久，农民们首先伙用他们的耕牛进行合作，从而奠定了中世纪合作农业村社—庄园的基础。当公元八世纪末采用三圃制时，它的效果更为显著。这种经过改进的谷物种植和休闲轮流提高了农业的效率；与古老的二圃制相比，它的犁耕工作量较少而种植面积较大。当然，二圃制适用于南部干燥的夏季。养牛只需消耗廉价的干草，大量节省了昂贵的食品、谷物或燕麦，但牛的行动迟缓，虽然用马耕作需喂以昂贵的饲料，但它意味着更有效地运用动物的能量，并且从公元十世纪起，马在农业中的作用已牢固地确立。

当穆斯林的影响在地中海岸扩展并且把浇灌作物如水稻及柑桔类果品引入西西里和西班牙时，那儿的农业经历了巨大的变化。这些新的作物和与它们相关联的技术缓慢地进入法国南部和意大利北部。在欧洲，黑麦和燕麦是小麦和大麦的劲敌，这较古典时期南方曾经出现过的情况更有过之。另一方面，由希腊和罗马人传入西班牙和法国的葡萄栽培法已经扎根，而那儿原来是饮

啤酒的国家。罗马帝国灭亡时，葡萄种植业已在一些著名的葡萄栽培酿酒地区，例如莫塞利、勃艮第、波尔多一带巩固地确立。在公元800到1000年间，葡萄树已扩展至中欧，甚至更远。苹果和梨树种植业从五世纪起也开始普及，从而出现了苹果酒和梨酒的生产，它们是十世纪常用的饮料。

如果说象西班牙和法国南部已失去饮啤酒国家的称号，那么在西欧，古老的凯尔特饮料仍普遍饮用。古老的啤酒是加入一些草药或混合料调味密封制成的。九世纪起，蛇麻草居于首位，一些修道院开始种植。从此，略带苦味的蛇麻草啤酒开始与古老的“水果啤酒”和其他香料啤酒或无香料的麦芽饮料（自那时起称为淡色啤酒）展开剧烈的竞争。到十五世纪末，这一长期争斗终于以蛇麻草啤酒的胜利而告终。

另一种可以观察到的变化是扩大乳酪和白脱的生产以供人们消费。白脱是古代人已经知道的，但除宗教目的外，很少食用。此时乳酪和白脱已成为富人日常菜肴的一部分，以后逐步出现在穷人的餐桌上。

木制容器的制作技艺和制桶手艺是中欧所固有的。实际上罗马人已从阿尔卑斯山区的凯尔特人那里学会了制作木桶和圆筒。在中世纪，木桶和圆筒的制作大有进步，因而在古典文明中曾经如此普及的陶器，在农业和调料、葡萄酒贸易中开始为木桶所取代。

## 陆路运输

罗马帝国灭亡所导致的最恶劣后果是中央政府的瓦解。它对陆地交通运输产生严重影响。在整个中世纪，这种影响不曾被完全消除。罗马政府把公共工程放在首位；而在中世纪，没有一个政府强大得足以实施罗马人在这方面已经做到的任何事情，或者为此付出费用。在理论上，公路维护是地主的职责，但很少有人履行。因此，虽然罗马道路系统保持了好几个世纪，但以后陆续

毁坏，到中世纪末期，因农民需用建筑石料，甚至把许多罗马时期的道路拆除。

罗马道路系统在穆斯林世界的延续时期要长得多，而西欧的旅行则变得十分困难。许多城镇、修道院和官员都有自己的信使，他们有时保持定期服务，先是步行，从十三世纪起，大多都骑马。货物运输因公路、河流、海上和市场的繁多通过税和关税而严重受阻，这些税收是为维护公路、运输系统而征收的，但极少有效运用。市政当局和个人虽然相当频繁地为维修桥梁和道路而赠款，但不敷使用。十四世纪日益感到“公路”在国家预算中应占很大比重。古罗马的道路系统一般都保存下来，但当罗马、考姆波斯坦拉和其他地方的许多重要神殿开始吸引大批朝拜者前往旅行时，新的公路就变得必要了。发展着的贸易促使某些城市修建新的相互联接的道路。十三世纪时，阿尔卑斯山区要隘重新加以铺设并有所改进。

中世纪的筑路工程师们不仿造古代那种结构一样的道路。他们采用由松砂路基上的鹅卵石或碎石筑成的大路，这种道路较易于随着冷热变化而缩胀。也修建了用灰浆和沙砾粘砌的石板路，或在沙土或地面上用碎石铺成的、加以适当夯实的道路。

中世纪的两轮或四轮货运马车与古代的无甚差异。但在较大的二轮及四轮车辆中已开始使用主车轴，这使牵拉牲畜能更有效地纵列拉车。前轴仍与主轴制成一体，但到中世纪末，通过转动灵活的枢轴把一个旋转接头附加于车架上。这种转动轮系首次出现于作战机械中，以后才逐步用于其他二轮车或四轮车。唯一的新型车辆是独轮手推车，自十三世纪以后就有关于这种车的说明及描绘，它有助于将货物运过阿尔卑斯山隘，其中大多数仍由“烧炭人”或驮畜牵拉。

## 水路运输

中世纪的大多数陆地运输实际上是取捷径抵达河岸或海滨。

（因为与古代情况一样），水路运输仍是最廉价的货运途径。古代的驳船仍在中世纪的河道内航行，但当西欧开始日益意识到它的大西洋海岸前线的重要性时，海运船只的建造发生了重大变化。虽然地中海的多桨帆船甚至商船逐步使用三角帆，并且只在有利条件下使用它们的划运能力，但这些船只不宜在大西洋和多风暴的北部水域里航行。关于北方船舶建造的独立发展情况不甚了解。我们仅知少数选架建造的斯堪的那维亚人的“长船”的例子，它甚至能驶航至冰岛和西班牙；我们还获悉当时逐步采用组合式船帮和真正的龙骨。对于弗里荷兰① 和丹麦战船的结构知道不多，而古代爱尔兰船则所知更少。

巨大选架建造的商船在船中央的桅杆上安装一张方帆，在十二世纪，桅杆上常设有嵌齿。我们有理由相信，这种船只是几百年前就已行驶在北海岸的大船的简单接长而已。十三世纪末，船尾舵使这类船只更易于操纵；与此同时，水手们已学会用方帆逆风行驶的技巧。在北方，这种帆较典型的地中海三角帆（它来源于近东，代替当地海域所用的古代方帆）更为普遍。

到十四世纪，一种新型平面接缝式船开始普及，它在海上逐渐排挤老式船。但是，除船尾舵外，浮动磁针的引入也许是促进海上航行的最重大发明。十二世纪人们已知道磁针，但约一世纪后才普遍运用。由于这样一些故事，例如说磁山会吸引并碰坏所有装着指南针和铁钉的船只，因而延误了指南针的使用。这项发明可能受到阿拉伯传说中极不相同的中国指南针的启发，但它在西方有完全不同的发展路线。

## 纺织工业

中世纪的织物生产分为若干行会。一部分工人梳理羊毛，然后由另一些人用纺杆上的纺锤把它们纺成线，他们把这些产品送

---

① 荷兰北部地名。——译者注

交织工，织工们所完成的织物再由其他工匠漂洗、修整、染色。由于在中世纪，上述操作中有几项实现了机械化，生产的经济要求使得复杂的设备成为必需，因而银行家开始在这个领域起作用。大多数行会都因缺乏资金受到严重阻碍，银行家对纺织工业各项操作的工业化着手筹措资金，并开始起雇主和中介人的作用。这就是为什么这项工业在富裕的弗兰德、意大利和英国等地如此繁荣的原因之一。

最先实现机械化的一项工序是漂洗。通常的漂洗方法是，把织物放在含漂白土的水中敲打或踩踏，以便使它们收缩和“结毡”，这样来填实织物裂隙，达到漂洗和洁净的目的。水轮的应用为漂洗工这项繁重劳动的机械化提供了机会，这时用装在水轮轴上的旋转滚筒使水推动升举的锤，这样水轮就可以完成几个人的工作。

实现机械化的第二项工序是织布。公元一世纪时，中国人已知道拉力织机及具有四个或更多综片的卧式织机，用这两种织机都可以生产较复杂的高档织物，如斜纹织物、缎子或锦缎。公元三世纪，叙利亚也采用类似的织机，但我们没有弄清它们的综片是用哪种踏板带动的。这种脚控综片代替手工操作的方法产生于十二世纪末和十三世纪初，并且大大加速复杂高档织物的生产。

第三项实现机械化的工序是纺纱。纱锭的锭盘有槽，用与一大轮相连接的带子驱动，而大轮则用左手转动。这样就把捻纱和缠纱工序机械化，但旋转运动仍由纺纱工的左手加以控制。这种原始的“摆轮”直到十九世纪还用于纺粗纱，它是在机械中运用曲柄的最早例子之一。曲柄可把往复运动变为旋转运动，也可以把旋转运动变为往复运动。它在古代很少应用，或根本不用。塞尔特（公元850年）所描述的曲柄用于推动磨盘，曾在手推磨中出现。这一原理在十三世纪用于摆轮和车床中（用踏板操纵）。摆轮的进一步演化是明显的。在十六世纪，摆轮不再用手摆动，而是用脚踩踏板推动，这样就腾出纺纱工的手。十五世纪时，由于对

纺纱轮引入锭翼，形成所谓萨克逊轮，便能同时捻纱和缠纱。

另一项重要的发明是波伦亚的波海沙诺于1272年制成的拈丝机。它是当时严格保守手艺秘诀方法的卓越例子之一，直至1538年，它的结构才开始在佛罗伦萨和意大利的其它中心被人们知晓用于丝织品制造。这些城市又把这类秘传一直保守到十七世纪才传到英国，虽然1600年左右索恩卡已描述过这种机器。只有当漂洗工和其他专业人员走出城镇去寻找水轮的水源，并从而使他们自己摆脱行会保守的经济政策时，才有可能在漂洗、纺纱和织布方面有许多改进。

## 铸铁和枪

在冶金领域内也发生了同样重要的变革。中世纪代表着铁器时代，这时，铁确定地击败了作为日常生活中通用金属的铜和青铜。在此期间，一些新的矿山和冶炼场所已在昔日罗马帝国边疆外建立起来，产生了论述采矿及冶金的文献，首先是为技艺和修饰中使用金属的金匠，尔后为其他技师所用。十二世纪起，在欧洲许多地方已以相当大的规模采煤，它用于冶金的某些初始作业.虽然由于森林面积缩小，木炭价格日益昂贵，但最终冶炼仍用木炭。

在十一和十二世纪，冶金业中运用水力不仅使矿石粉碎和其他操作机械化，而且借助于水力驱动的风箱为熔炉提供了一种增大鼓风量的手段。这时，不仅那些已破碎和洗过的铁矿石可以直接炼成生铁块(或生铁坯)，然后再进一步把它们炼成熟铁或钢；而且在某些类型的熔炉中，由于它们足以使炉内物长期保持高温，因而生铁可以吸收足够量的碳而熔融。十五世纪前，还不可能真正使用这类“铸铁”，因为对铸铁的处理尚需一些新的技术，而后者的发展经历了一个世纪。这类熔融产物可以和青铜一样加以处理，这是许多世纪以来冶金工们已经熟悉的方法。除铸铁外，还生产出各种质量的熟铁和钢。钢或用坩埚，或用某些类型的熔炉

炼得，但钢仍是一种价格很高的铁。武器和工具制造者以及金属镶嵌工人需用大量的钢；当时的金属镶嵌工往往是近东移民，或从特别擅长景泰兰和镶嵌技巧的东方入侵者学得此项手艺。很精致的大马士革钢上的波形花纹技术被加以采用，甚至在加洛林王朝和梅罗文加王朝时代还有所改进，这类技术在西班牙的许多中心，象托莱多等地实际采用。

铸铁生产对火器制造具有极大的重要性，这些火器逐步代替以希腊和罗马的模型为基础的老式石弩和石炮。包含硝石、轻石油馏份和其他配料的燃烧混合物在东方很早就已为人们知道，十字军参加者已带回有关可怕的“希腊火”和穆斯林军队所用类似武器的报告。其组成是严格保密的，而这秘密是如何传播开去，仍然是个谜，但世界各地在不同时期里都出现了火药的变种及类似物质。由细碳末和硝石（硫华是以后加上去的）组成的真正的火药似乎是1320和1330年间在下莱茵河地区发明的。锻造的熟铁或铸铁“射石炮”当时开始使用，到1350年大部分为青铜铸造武器所取代。大约三十年后，铸铁枪的正确技术已经诞生，在十五世纪初，这类枪枝的铸造是直接由熔炉注入模子。“铁的成型”技术迅速扩展到法国东北部、意大利及其他更远地区，并且不论是火器或是炮弹，一般都不再采用锻造方法。

在其他领域，铸铁的优越性，也得到证明，通常认为铸铁是中世纪冶金业所特有的。生产铁丝用的拉板是十世纪发明的，在中世纪文献中开始出现关于铁丝作坊的描述。手枪、长柄大镰刀和钢针的生产也获得了发展，并在十五世纪投入使用。特种类型的铁或钢在欧洲通过商业渠道集散。这里我们再次发现，象较为复杂的熔炉、锻件、水轮等设备需由银行家提供资金并组织交易，而行会本身对此已难以胜任。

火炮和火器的采用对技术的发展有两个重要影响。火炮导致对抛射体轨道和其他弹道学问题的研究，这种研究又促进了万有引力、碰撞和其他与力学有关问题的研究，这些问题的解决远远

超出仅为战争服务的范围。此项技术发明是使科学家逐渐对工匠的工作发生兴趣、促进科学和技术之间合作的因素之一。

火器的运用也引起当局对工具和零件标准化必要性的关注。最早期的枪枝各有自己的枪弹系列，但军事当局很快就意识到枪枝及子弹可互换的重大意义，当用火器武装步兵和骑兵时，这种必要性变得更加迫切。在武器标准化后，紧接着是标准的训练和制服。对于航行在海上并在其沿岸粮站附近建有这类备用零件储存库的舰队来说，零件标准化也成为必需。

## 围海造田

从十世纪起，西欧开始向森林、沼泽、海洋进军；在这方面，象班奈狄克特、帕瑞蒙斯脱拉坦特和西斯特等修道院起了很大作用。新的民用工程技术应运而生。七至十一世纪间，大部分低地国家筑堤防止海水入侵来有效地保障安全。在这些区域的许多地方，沿海的盐碱地和浅沼泽地因种植欧洲蓬子、星状海草和盐滩芦苇而得以加固。最后用适当的堤坝向海洋夺取这些土地。“修堤工”们很快学会用粘土、芦苇、海草等物加固堤坝的技术，并用在堤坝前面竖立栅栏的方法作进一步的保护。

这些围成的土地或“新辟的低地”内的渗水和雨水必须定期排除。从十二世纪起，在这些新辟的低地和其他低洼地带挖掘了许多水渠，河堤也进行了加固。排出的水通过坝内所建的闸门，有时通过导流坝，在退潮时流入海中。这种闸门导流坝当然是水路运输的障碍，以后水路运输开始使用泄流运河作为通向国内所有地区的方便途径。虽然建成斜面能把船只拉过导流坝，但对大型驳船来说，要在水流上驶过导流坝是不可能的。

这种情况促使低地国家和意大利可能是相互独立地发明了拦河坝闸。十二世纪达姆附近的一连串闸门在1394—1396年间提供了真正的拦河坝闸通道，但较早的拦河坝闸似乎是在1315年左右在阿姆斯特丹附近的斯帕恩达姆使用的。十四世纪末这样的拦河

坝闸已在上述地区普遍使用。意大利的进展则不同，那儿拦河坝闸的建立是根据米兰附近的河流和渠道只有依靠一系列导流闸和堰闸才能通航这种实际。十五世纪，几位工程师协助研制了真正的腔式闸。达·芬奇（1452—1519）确实发明了斜接闸门及腰门，它们使拦河坝闸的航行操作大为简便。

1435年起低地国家使用类似“水耙”的原始挖泥机，但在此后一百年内，它们并未发挥成实际可用的工具。

## 日常生活技术

中世纪在改善舒适的生活条件方面几乎没有什么进展。光源仍然只是火把、蜡烛和油灯。优质的蜂蜡和蜡烛这时已可供利用，但它们主要用于教堂和富家，穷人则使用油灯或日没而息。1290年左右发明的眼镜也未发挥效益，因为在一个很长时期里，眼镜极其稀少，而且价格太高。炉灶明火仍是室内取暖的唯一方法，在所考察的时期末，砖砌的火炉在中欧日益普遍。

食品也没有重大改变。富家的白脱代替脂肪，而穷家则食用油菜籽、菜油、牛油或猪油。一般说来，面包、蔬菜和鱼是中世纪的主要食品；至于肉类，则连富人的餐桌上也少见。冬季不得不屠宰大部分牛，并把牛肉贮存起来，因为没有足够的干草可让它们在牛棚里顺利过冬。腌制、盐渍或熏制的方法已从古代人那儿继承下来，但对内地供应廉价鱼类的方法有所革新。约1330年包克尔松首创把腓鱼的内脏取出，这种方法可将加盐的鲱鱼保存很长时间。

葡萄酒、啤酒和淡色啤酒是大众饮料，但酒精蒸馏方法的发现使药剂师和蒸馏工人能生产酒精度高的饮料，它们开始取代过去的饮料并出现前所未有的酗酒现象。十二世纪开始使用餐叉，它象钮扣那样在相当大的程度上改变了社会的风尚。

肥皂，是在普林尼时代居尔特人的新发明，它从二世纪起用来洗涤衣服。肥皂的使用促使七世纪意大利制肥皂工人多得足以形

成一个强大的手工业行会。到十三世纪，整个欧洲都使用肥皂，需求量一直超过供应能力。肥皂的供应量取决于植物草灰的可利用程度，而当时欧洲只有唯一的碱性物质来源可供利用。且玻璃制造对此需求量已经很大。把草灰与水、牛脂和橄榄油或燃烧用油一起煮熬，有时再加入豆粉，就制得绿色或黑色肥皂，香皂是从十六世纪起为富人们生产的。只有当质量较高的碱生产出来时，才开始能使用白色肥皂。

当时缺乏洁净的水源。不是所有城镇都有罗马水渠；即使有，也不是经常维修得很好。水源主要是井和河流，但由于公用下水道和街道的清洁不如以往保持的好，所以卫生状况远次于罗马帝国的标准。只是在中世纪后期，政府或市政当局才开始为正式供水而拨款，并安装了第一批水力驱动的泵，这是即将到来的由重力流水系统向压力系统转变的标志。

十四世纪前，大多数欧洲城镇不曾对街道铺筑路面和进行修整。入夜，街道难得有照明，市民们不得不提着灯笼探路。但是，当弹簧或重力带动的时钟制成时，时间在日常生活中开始起到更为重要的作用。这种机械钟在十三和十四世纪设置在教堂钟楼内。小型私人计时器在中世纪末才普遍使用。

## 新的装饰技术

中世纪时，由于与阿拉伯世界，因而也间接地与远东接触的缘故，人们学会了制造较为优良的玻璃和釉料。生产了上彩釉的陶器和饰花陶器，这类优质陶器不仅使化学家可以使用象强酸那样的腐蚀性液体，并且也为家庭提供了较为优质且更为美观的陶器，它们开始取代较贵的锡镴容器和金银餐具。

玻璃生产的规模也扩大了。这是因教堂需用着色玻璃窗促成的。玻璃在北方先是起着南部国家的云母与雪花石膏板的作用。格窗玻璃仍用浇注和拉丝方法进行生产，或吹成管子，然后把管子切开并弄平，但这种方法不能生产大的格窗玻璃；中世纪时它

们通常都用许多小格玻璃组成，用木格子嵌牢。装玻璃工人用由铅条夹持和加固的彩色玻璃片为教堂生产着色格窗玻璃，这些铅条形成窗户设计的一部分。

玻璃在例如莫拉诺（威尼斯附近）那样的一些中心进行生产，这些地区的人们熟知玻璃焖火的古代技艺，这项技术从那里向德国和法国传播。实验室专用陶器和玻璃制品在意大利和德国的几个城镇里生产。

装饰技术是在教堂和礼拜堂墙上绘画的建筑师们所要求的，为的是方便不能阅读拉丁文圣经的群众。大部分这样的绘画都画在石膏砌成的庭院或石膏粉板上。石膏粉板是一种由白垩、石膏、胶水或明胶制成的混合物。用蛋黄调和颜料作画于其上。真正的壁画，即在湿石膏上作画，在十三世纪得到推广，当时开始生产由色料、蛋白和树胶组成的新颜料。油彩的应用使绘画受到新的推动。由色料和干性油组成的这类混合物是意大利人发现的，在约1400年传到弗兰德，当时范·伊克斯开始使用这些新技术并使之出名。除了古代已知的颜料和色料，还获得许多新的配料，并重新发现一些旧的、已被遗忘的方法，例如用铅和醋制成白铅，以及象硃砂那样的材料。

## 纸和印刷

羊皮纸仍是文件和装璜精致手稿所使用的主要材料，但造纸技艺缓慢地由阿拉伯世界传入欧洲。十五世纪中叶，纸的生产已经巩固地确立，并从市场上排挤精制羔皮纸和羊皮纸。鲁斯曾说过：“十四世纪亚麻布的普及不仅标志着个人卫生的明显进步，而且也促进了优质纸的生产，从而推动了文学的发展”。

这可能是一种夸大的说法，但纸出现后不久确实发明了印刷术。我们通常所说的印刷术实际上是两项独立发明的组合。一种是用雕版印刷方法印书的技艺，它可能从中国通过草原或经阿拉伯世界传入欧洲，虽然还没有发现有关这种说法的证据。欧洲最

早的雕版印刷书籍出现于1470年。第二项发明是活字印刷，用可互换、可更替的金属铸成的字母进行印刷，是走向工业机械化的又一步骤。这时，即使重印手抄本，即使是由不了解语言写成的手抄本，也逐渐变成铸造和排列必需铅字的机械操作。通常把古腾堡推为金属活字的发明人，虽然哈伦的考斯特是此项荣誉的激烈竞争者。无论如何，1454—1455年间首批印成的书籍标志着情报难于获得、发明传播缓慢（对工匠和工程师来说尤为如此）时代的结束。

## 工匠和工程师

古代人已经知道，不把理论和实践知识结合起来，工匠就不能发展自己的手艺。维特鲁维斯及以后的作者曾把建筑师描述为必须是一个“计划的设计者和工作的检查者”。承认需要优秀工匠那样的工程师，但并未采取任何步骤来训练他们。罗马帝国灭亡后，这类呼声销声匿迹，工匠们仍无受教育机会。因此，在十世纪后，经常把建筑师看作砌砖工人，换句话说，建筑师只是一个能工巧匠。只是到了十四世纪，我们确实看到建筑师一词又一次在建筑活动的设计者、计划者和组织者意义上使用。中世纪早期表现出的技术创造性，一方面由于行会的保守政策，另一方面由于科学家不能掌握自然规律，不能以工匠能够运用的方式表述这些规律而受到限制。技术只是随着手工业工人的移居而得以传播，手册并不方便可用，工匠只得根据自己的经验加以判断和制造，他们虽知凸轮、嵌齿及其他机械零件和材料，但不能恰当地了解它们的相互作用，并且不能确定他们所使用的材料的强度，总之，他们没有可供运用的应用力学以帮助自己。当1295年约翰·卡帕特兄弟在道斯坦布尔制造马拉磨时，发现用一匹马推动这种磨的要求不能实现。四匹马才勉强使它转动！早期的水轮和风车机械表明当时几乎没有认识到摩擦作用，同时表明嵌齿和凸轮的经常磨损和撕裂问题通过在同一水轮上使用凸轮数量大大多于

通常的方法轻而易举地解决了。

如果说一个工匠通过运用自己的经验最后发明了一种良好的工具或机器，收获成果的唯一途径是保守秘密。只有到十三世纪，发明者才偶而获得利用其发明的特权。威尼斯政府最早为发明者提供法律保护（1474年）。

印刷术发明后，能工巧匠们就能表达自己的见解了，他们的努力开始引起人们的注意，科学界的兴趣和共同合作已经建立并获得了发展。

# 第九章

# 天文学的革新

## 中世纪的天文学

托勒密统治天文学直至十六世纪，这样说并不夸大。但不应把这种说法理解为对托勒密权威的不加批判的盲从。托勒密体系受到了检验、补充，对细节问题进行了必要的争论；该体系的某些基础是违背原则的。但他的固有权威是建立在优秀工作质量基础上的，是非常伟大的，没有受到严重的削弱。根据托勒密体系计算而制定的星历表（一种既包括日历又提供关于太阳、月亮和行星位置的天文数据的图表）逐步有所改进。除了按托勒密理论推导的星历表，在十六世纪前，还没有按其他理论假说推导出来的星历表。因为天文学家的任务就在于计算星历表，他们所依据的体系被认为是理所当然的。

从历史的观点看，对上面所述的检验、补充和批判作一番介绍，是有意义的。但若详细讨论这些内容，便超出作为简明读本的本书范围。我们的讨论局限于主要论点，首先讨论阿拉伯的天文学。

早在公元九世纪，天文学家阿尔法拉加尼斯（九世纪）就把《至大论》翻译成阿拉伯文本，并加以注释以便于阅读。在同一时期，塔比特·伊本·库拉提出一项具有重大历史意义的新的岁差理

论。根据此项理论，二分点在黄道上无持续进动，而是作摆动。因此，他的这项理论被称为黄道的震动理论。

各天文台的天文观察均使用来源于古希腊人的仪器，但在效率和设计方面有所改进。阿拉伯人对于星盘特别注意，以后逐步发展成为一种通用观察仪器。

在所有的阿拉伯天文学家中，居最重要地位的是阿尔·巴塔尼（约858—929，原文106页），他通过测量修改了托勒密确定的许多天文学常数的数值。他所确立的事实之一是，太阳运行轨道的远地点在当时是在双子座22°17′，而《天文大全》中已发现是在双子座5°30′。虽然这种不同部分地可用岁差加以解释，但其余的差值则指明远地点本身具有确定的运动。

持续的观测导致偶尔出现新的星历表，如阿尔·查格利（1029—1087）编制的托莱多星历表。

在这些星历表编制的年代，当时在哥多瓦哈里发统治下科学得到繁荣的发展。对托勒密原理的最早和唯一的异议起始于这个时期。这种异议针对托勒密关于行星圆周运动的中心不是地球的假说，而此说被认为是与亚里士多德学说的基本原则不相符的。作这种批判的主要是阿尔·贝特鲁奇（十二世纪下半叶）。他与欧多克斯的同心圆理论相联系而发展了自己的世界体系，企图以此代替托勒密体系。但由于这一新的体系从未详细加以研究，也不曾据此计算星历表，因而不能说它曾经是托勒密天文学的劲敌。

阿拉伯学者对天文学的一项极重要的贡献是发展了天文学的基本辅助学科——平面和球面三角学。阿拉伯数学家们已从印度人那里采用了正弦，用以代替希腊人的弦作为弧的量度；他们还提出其余的正弦测角函数。由于许多数学家和天文学家，尤其是阿尔·巴塔尼、阿布·阿尔·瓦法（940—约997）和纳西尔·阿尔-丁-阿尔·杜西(1201—1274)等人的努力，使三角学成为一门独立的学科，它达到了很高的发展水平，以致后来西方人只消直接采用即可。纳西尔·阿尔-丁-阿尔·杜西是蒙古统治者叙

拉库伊儿可汗（波斯的伊儿可汗）在马拉赫所建的天文台台长。观察的结果均编入伊儿可汗星表内（1272）。

对阿拉伯天文学作了上述简要的回顾后，对西方中世纪的天文学只能予以更为简短的介绍。1175年克雷莫纳的盖拉尔特把《天文大全》译成拉丁文。他考虑到西欧的数学水平较低（还未达到接近同时期的阿拉伯发展水平），就附上《天文大全》的内容摘要。在以后一个时期内，这类纲要是研究托勒密天文学的唯一来源。特别是其中由萨克罗伯斯哥（霍尔渥特的约翰，卒于1256年）编纂的水平不高的《论球体》一书，流传甚广。

通过米恰尔·斯科脱斯对阿尔帕特拉宙斯著作的翻译（1217），反对托勒密、支持亚里士多德的思想亦渗入西方，但未持续下去。与此有关，某些历史学家论及亚里士多德和托勒密之间的争论，认为这个争论以亚里士多德被逐出天文学领域而告终。这种说法不甚准确，实质上，托勒密体系过去是，后来也仍然是彻底的亚里士多德主义的。斯塔吉拉特的权威并未因阿尔帕特拉宙斯学说的反驳而受到动摇。

某些西方天文学家，如圣·克劳特的威廉（十三世纪下半叶）和杰思·德·缪尔斯（十四世纪上半叶）也对当时的天文表进行了检验和批判。这些表不再是阿扎切尔的托莱多天文表，而是新的阿尔方索天文表，此表按照卡斯蒂尔国王阿尔方索十世的命令，在1252年编制，到1296年左右才为巴黎人所知晓。这些表与托勒密体系一起，一直使用至十六世纪。

西方天文学的一项重大课题是历法计算。在朱利安皇帝推行的朱利安历法中，一年为365天，每第四年为366天。这样就确定一年的时间为365天零 6 小时，即长了约11分钟。约130年内误差累计为一天。因为每年时间过长，因而每年终结也过晚，这样，太阳通过春分点的凌日每年都提前。长此以往，既扰乱农业活动和历法之间的关系，也有碍复活节日期的固定。所有中世纪的天文学家都从事于解决这一问题。随着时间的推移，提出并考虑了

许多改革方案，但直到1582年教皇格里哥利十三世才实施以他的名字命名的历法改革，除使历法适应天文事件外，复活节日期的固定仍是个难题，它涉及天文学的一个独立分支，计算天文学。

历法改革问题极大地促进了对天文学的兴趣和研究。它对占星术也起着相同的作用；占星术在整个中世纪备受尊重，当教会认为它盛行过头时，才予以反对。由于西方利用由阿拉伯文翻译过来的一些著作，在这方面也仰赖伊斯兰文化。我们指出阿布·马萨（卒于886年）的著作作为其中一例，该书经常为人们查阅。

中世纪的天文学以两位德国天文学家裴尔巴赫和瑞吉奥蒙塔努斯的工作而达到顶峰，至此这个时期结束了。前者的《新行星论》由后者自己在纽伦堡创办的出版机构于1472年出版，该书证明托勒密天文学已完全融入西方思想。《天文大全》本身的拉丁文版于1515年出版于威尼斯，其原文版则于1538年出版于巴塞尔。人文主义学者已搜集到《天文大全》的手稿并辨认出正确的文本，因而使天文学从中受益。在这些学者中间包括裴尔巴赫和瑞吉奥蒙塔努斯以及他们的主要人物卡丁纳尔·约翰纳斯·贝塞利翁（1395—1472）。

不只是上述两位天文学家，而是许多天文学家都已经同时得出结论：托勒密体系没有表现出有足够精确的观察，特别因为它必须借助于复杂难懂的处理方法。天文学家强烈地感到需要作彻底的改革，但是如何处置，他们不知所措。下文将讨论那位成功地实现此项任务的人物。

## 哥白尼（1473—1543）

尼古拉·哥白尼是东普鲁士弗仑堡大教堂牧师会的一员，作为一个天文学家，他把毕生的精力奉献于发展以太阳为中心的宇宙图景，而不再是以地球为中心的托勒密体系。

哥白尼这一思想并非是他所首创。如前所述（原文52页），古希腊萨莫斯岛的阿利斯塔克已经指出，假设地球绕自身轴周日转

动，就可以解释天穹绕自身轴的周日转动，假设地球在绕太阳的轨道内周年转动，就可以解释太阳相对恒星的周年运动。这项理论的第一部分已成为十四世纪经院哲学讨论的主题。

特别是奥瑞斯姆，他论辩说，这种观点在天文学上是站得住的，他保卫这个理论使它免遭神学的反击以及根据孤立的观察和亚里士多德物理学（它在其他许多方面是与此理论一致的）所提出的异议。

如果太阳、地球和恒星不是与任何行星同时存在着的，那么这一经过改变的观点，相当于观察者从地球转移至太阳，并没有对宇宙的理论概念作显著的简化。但这是一种考虑到行星存在的简化理论。因为它证明了可以把行星运动中的所谓“次级不规则”，也就是相对于恒星的周期性逆行理解为地球绕太阳的周年转动。因此，托勒密为说明这一现象而需要的本轮就成为多余的了。

可以看出，这一概念对于外行星P来说是合理的。(图11)

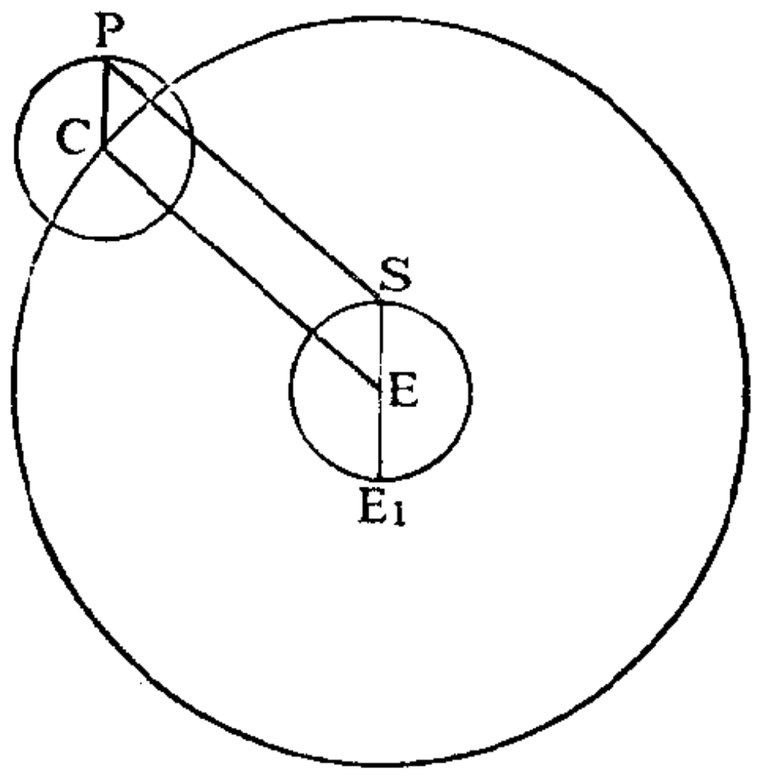



图11. 托勒密的行星运动向哥白尼行星运动的转变

根据托勒密学说，行星P绕中心为C的一个本轮运行，其矢径CP永远平行于从地球E至太阳S的矢径。也可以假定CP等于ES。这样，四边形ESPC就是一个平行四边形，SP平行于EC。假定EC以匀速绕E转动。在此情况下，SP绕S匀速转动，而S则描出以E为中心的圆周。因此也可以说，这是行星P所描出的以S为中心的本轮的均轮。如果假设在任何时候都把整个系统中的S置于E，因而将P置于C和E置于$E_1$*，那么情况就变成这样：地球E和行星P都匀速绕

---

*此处原文为E，似有误。——译者注

太阳S旋转，这就是哥白尼的概念。

如果在任何时候从认为是固定的S点以实际尺寸和方向 画出SE和SP，也可以得到相同的结果（图12）。图12示出太阳、地球和行星在三种位置时的情况，每一位置用下标 1， 2， 3表示。

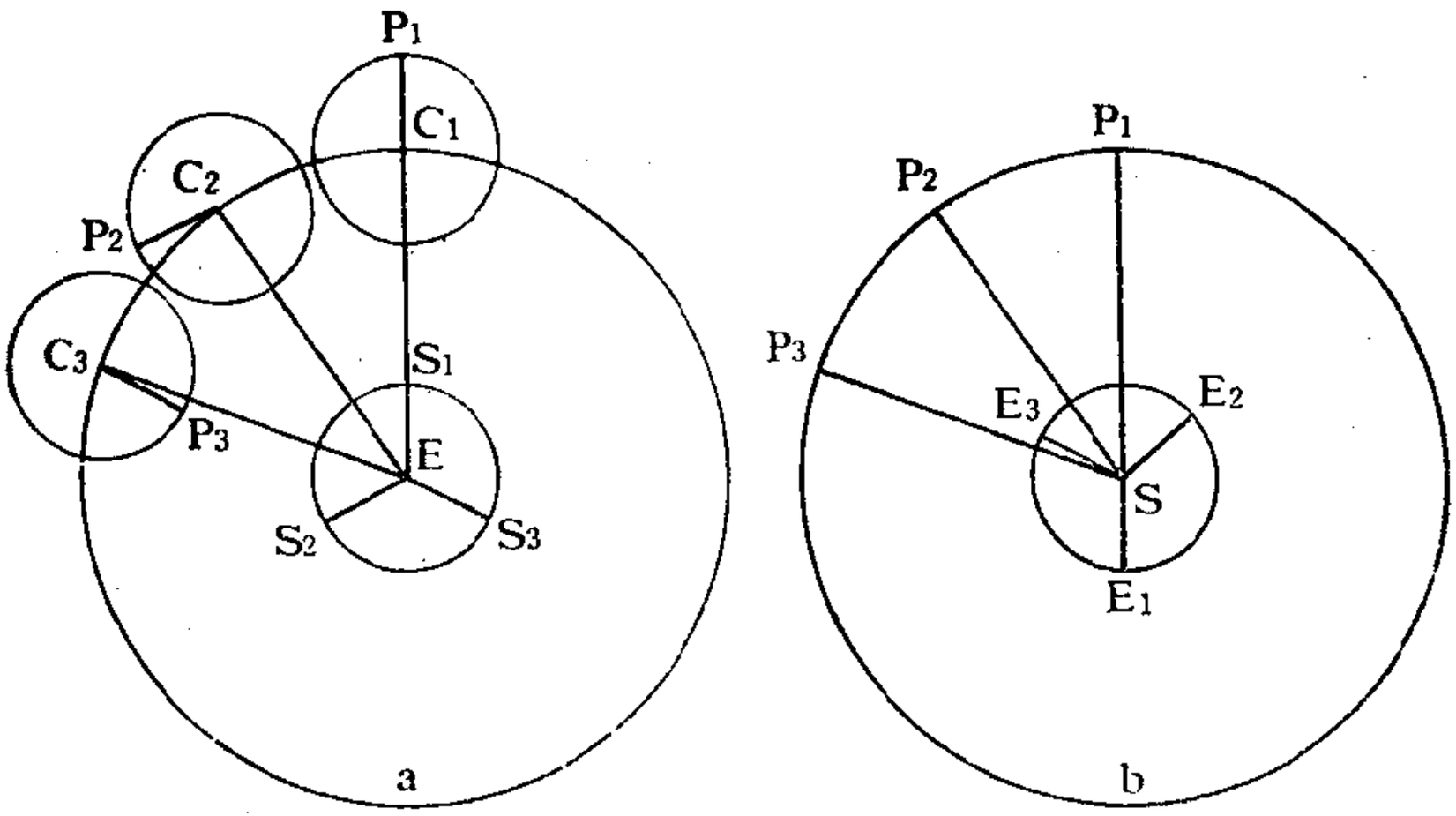



图12. 托勒密的行星运动向哥白尼行星运动的转变

对一个内行星来说，转换成新的体系甚至更为简单，因为内行星本轮的中心位于地球-太阳连线上。如果取其于太阳 内， 即可获得一个金星和水星绕太阳转动的体系，而太阳的轨道则绕地球运行。

当然必须记住，上面的表述是高度简化的，未考虑偏心率和均匀性。如果考虑这两项因素，也可以由托勒密体系转化为哥白尼体系，但要困难得多。

现在可以把按上述方法简化后的托勒密和哥白尼两体系并列示出以资比较（图13)。为清晰起见，我们仅限于一 个 内 行 星 V（金星）和一个外行星 J（土星）。

哥白尼在其《天体运行论》(1543年出版)的第一卷中，以概略图示法解释了他的体系，他在该书中还反驳了对于地球运动的异

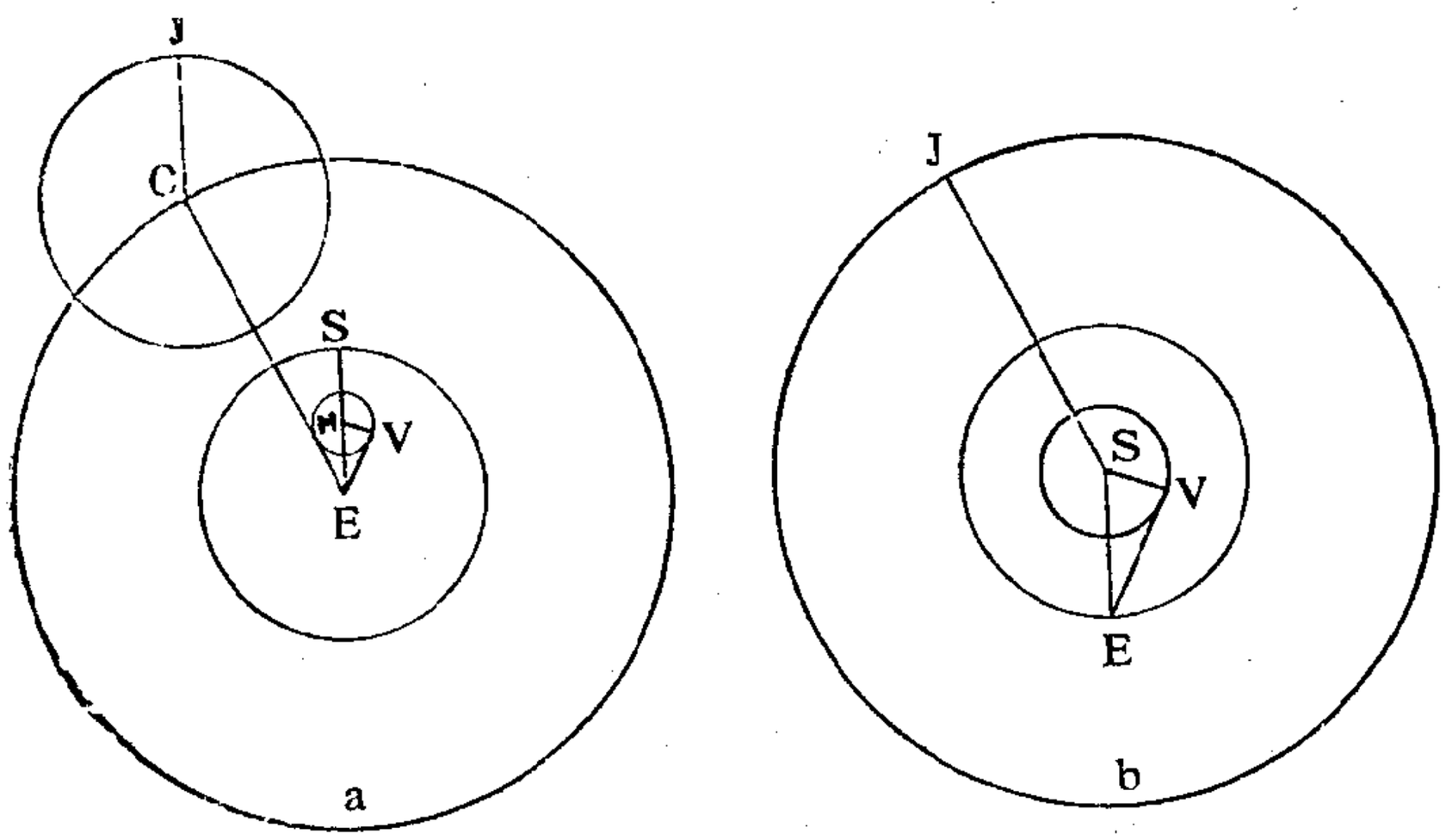



图13. 托勒密（左）和哥白尼（右）体系的对比

议（实质上与奥兰斯姆已经采用的方法相同）。他为自己理论所持的主要论据是，按此理论得出的太阳系图景较旧理论所得出的更简单、更美。确实，当时并没有其他的论据。他很重视这一考虑：太阳（其占支配地位的影响一直被人们所承认）最后终于被置于其所属的中心地位。

有一种强烈反对他的论点，即地球绕太阳的周年运动应由恒星位置的周年变化及行星的本轮运动反映出来，哥白尼对此的唯一回答是，由于恒星相距无限遥远，因而这种作用很难观察到。这个答案是正确的，但在当时它的说服力不大。

现代读者在仔细阅读《天体运行论》内容丰富的第一卷后，若接着翻阅该书的第二至六卷，通常都会失望，这几卷内有很复杂的天文学技术上的讨论和计算，其中对天体现象用偏心度和本轮作实际的解释，并晓以编制天文表的方法。某些历史学家甚至惊异地发现，哥白尼倒退到堪称为“对古代世界体系作微妙处理”的境地。仔细考虑一下马上可以明白，没有任何理由说他倒退。当然图13的概略表示不足以说明哥白尼如何反对托勒密详细

阐述的体系以及由此计算出来的天文表。在第一卷以后，哥白尼不得不开始专门的技术性研究，为此，他除了运用托勒密所曾经用过的方法外，没有其他办法。唯一的区别是他运用了球面三角学，因为通过瑞吉奥蒙塔努斯的一本著作，西欧已普遍懂得它。除此之外，不妨可以把《天体运行论》看作是公元二世纪的书，因为它完全是以古希腊天文学的风格写成的，这样就可以再次证明它的巨大的历史重要性。

哥白尼所采用的方法甚至比托勒密更加希腊化。他比托勒密更为紧密地追随柏拉图学说，因此他拒绝运用等分度的便利，因为它事实上违背柏拉图学说。他甚至认为，他成功地使天文学摆脱等分度，并且重新按照真正的托勒密精神对待天文学，这是他最本质的和最重要的成就。但只有求助于新的本轮才能做到这一点。

《天体运行论》第二至六卷详尽阐述这一理论，此时可以立即看出，太阳的位置并不象在第一卷中以奔放激昂的言词所宣称的那样完全处于世界的中心。如同托勒密理论中地球已经偏心地位于太阳的运行轨道内一样，太阳也偏心地位于地球的运行轨道内。实际上它只有一种功能，即照耀宇宙的光学功能。因此，通常称哥白尼体系为“日心说”是不严格正确的，而我们发现托勒密体系也不是“地心说”。因为我们在上文提到“地静说”一词，所以在这里就称为“日静说”。

哥白尼的著作开始时只在天文学专家的范围内为人所知，在向教皇献辞中已经强调指出，该著作确实只是为着天文学专家而写。新体系最终导致的世界概念的强烈的变化，在当时并没有多少人注意。其理由之一可能就是在前言中所陈述的，关于地球运动的假说只是由于用数学构想方法解释现象而引入。并不打算坚持地球确实是在运动着的。后来发现，这篇前言并非出自哥白尼本人，而是出自神学家奥塞德（1498—1552）之手，他监督此书的印刷，显然他想用先发制人的方法防止可能来自教会的反

对。

天文学家们在任何情况下都可以用该书所提供的天文学结果而不必关心地球是否确实运动着。因此，天文学家伊洛谟斯·雷霍特（1511—1553）根据哥白尼理论计算出“普鲁廷”天文表，但对于此理论本身是否可靠不表示自己的观点。

哥白尼的著作是对理论天文学的很有价值的贡献，但在改进天文观测技巧和补充可供利用的经验资料方面无甚补益。哥白尼坚信——已经证明他过于相信——过去一些作者所记录的观察。例如，这使他接受岁差的黄道震动理论，甚至进而用复杂的论据从理论上论证这种理论。但是天文学观测的进步是极为必要的。人们知道，理论并不与经验相吻合（甚至在普鲁廷天文表中也是如此）。经验数据太少，也不十分精确，因此运用这些数据不足以确证所提出的宇宙体系。此时一位人物应运而生，他满足了这些天文学上的要求：这就是丹麦天文学家第谷·布拉赫。

## 第谷·布拉赫（1546—1601）

第谷以与哥白尼为革新理论天文学所具有的相同的信心和韧性，毕生致力于天文学观察的改进。是他首次明确地意识到，为了获得经验数据，需作经年累月的系统观察，系统观察同时还要有观测手段和精力。他在许多同事的帮助下，从1576至1596年间，一直在哥本哈根海峡赫芬岛上的乌拉涅堡天文台，对太阳、月亮和行星的位置进行观察。他使用在他指导下精心设计的新的大型观测仪器，并以卓越的观测才能，成功地把测量精度减至2′，而托勒密和哥白尼的此项精确度约为10′。

第谷在理论天文学方面成就不大。当然，他完全意识到托勒密体系的缺陷，并深知哥白尼体系所取得的进步。但是，部分是由于神学上的，部分是出于实际的原因，他强烈反对地动假说。然而，为了想从哥白尼概念的便利中获益，他采取了一种折衷措施，即设计了使地球保持固定的中心位置，而设想行星绕太阳转

动的这样一种体系（称为第谷体系）。从上述由托勒密体系转换为哥白尼体系的讨论中可以看出，这种体系是可能的。第谷仅停留在把太阳作为行星本轮运动的中心这一点上。

限于本书范围，一般不允许提供传记细节，但第谷是个例外，因为他于1596年离开丹麦并在旅游后定居于布拉格，任鲁道夫二世皇帝的宫廷数学家一事，对于天文学的发展具有极其重要的意义。这一事件使他与天文学家开普勒有了私人交往，并通过开普勒的活动使他的毕生工作得以开花结果。

## 约翰纳斯·开普勒（1571—1630）

开普勒是格拉茨大学预科教师，因其于1596年问世的《宇宙的神秘》一书而引起第谷的注意，他在该书中力图对下述事实提出充分的理由：确实存在六个行星（作为哥白尼的信徒，他认为地球是古代已知的五个行星之外的第六个行星），它们与太阳的距离之比正是哥白尼体系所指明的。为此目的，他把太阳系的构造与五个正多面体的几何理论相联系。虽然第谷并不相信这种互相关系，但他认为开普勒是个天才。当他定居于布拉格后，就请开普勒合作，而开普勒是一个新教徒，因反革新措施而感到不自由，就在1600年接受他的请求。

第谷指导开普勒处理火星的观测结果，相信开普勒会按他自己的折衷体系处理。但开普勒是一个非常坚定的哥白尼主义者，且在其他方面（如关于太阳在宇宙中的位置的概念）与第谷的差异是如此之大，以致他不能按照第谷的意愿行事。但第谷在1601年去世后，开普勒至少可以自由地处理火星观测资料，而第谷的后继者们起先拒绝使用其他的观测系列。

现在开普勒面临把火星设想为一个符合第谷观测资料的运动系统的任务。他很自然地试图采用传统方法借助于偏心率和等分度去实现这项任务。因为他并不象哥白尼那样反对等分度。起初似乎他会获得成功，但当他把按照他的体系计算出来的位置和第

谷观测所得的相应位置进行比较时，发现两者相差8分弧度。这一情况不曾使托勒密或哥白尼苦恼过。但是开普勒是如此信任第谷的观测精确度，以致这一差异足以使他抛弃已经发展的体系。为寻找一个新体系作了几年的努力，其后一些考虑（此处不能一一指出）驱使他顺着完全不同的思路前进。经过许多踌躇，他觉得不得不（这是近两千年来第一次）放弃柏拉图学说，而采纳非均匀圆周运动。最后他得出行星运动的两条定律，它们于1609年在他的《新天文学》中发表时，冠以他的名字。

（1）行星的运行轨道是一个椭圆，太阳位于它的一个焦点。

（2）太阳—行星的矢径所扫过的椭圆扇形面随时间成比例增加。

后一定律也可以表述如下：在相同时间内，矢径扫过相同的面积；或者说行星运动的面速度是常数。

开普勒定律比哥白尼体系更加严重地背离古代的传统。因此有时把天文学革新的起端归之于开普勒而不是哥白尼，这也没有什么不合适。这样做还有另一个理由。开普勒的《新天文学》的副标题《天体物理学》意指一种研究纲领，而对他的许多同时代的人来说，这种研究纲领是荒谬的。

古代的天文学实际上是一门天体数学：它对天空发生的事件作数学描述，而不要求任何物理实在性。哥白尼恪守这一概念，至少在其《天体运行论》的第二至六卷中是这样。但开普勒想做更多的事：他还想从物理上解释天文现象。为此他设想从太阳黄道发出作用于行星的力场。但由于他仍信奉古代的惯性概念（原文39页），即只有当物体运动方向经常作用着一个推动力时，该物体才能保持运动，所以为要说明行星绕太阳的运动，他只能假设太阳是旋转着的，因而力场也是旋转着的。几年后，由对太阳斑点的观测而实际表明这种旋转运动是存在的。

虽然开普勒的动力学解释证明是站不住脚的，但它具有十分

重大的历史意义。他的伟大功绩就在于他试图建立天体动力学。亚里士多德关于天体与地球是根本不同的学说已遭巴黎唯名论者的攻击，开普勒的天体动力学与这个学说断然决裂。开普勒还用力的作用反复解释他的理论细节，这种力常常是磁性力；这是一个指征，表明英国医生吉尔伯特在其1600年出版的《论磁体》中的论述对开普勒时代的思想产生了非常强烈的影响。

开普勒的自然观与毕达哥拉斯派认为世界秩序（其中包括音乐，它也是世界秩序的一种表现）可以用数学表示这一信念密切相关。在1619年的《声学世界》中，这个思想模式甚至比在《宇宙的神秘》里反映得更多些。《声学世界》一书确立了天文学、数学和音乐之间密切的相互关系。书内描述了和主题关系不大的行星系统的规律，即开普勒第三定律：

（3）所有行星运行轨道纵轴一半的立方与转动时间平方之比，具有相同的数值。

前两项定律表示每一行星如何运动；第三定律则指出有关行星系统结构的某些情况，他在《宇宙的神秘》中所提出的目标终于在第三定律中达到了。可以说，这三条定律加在一起，是天文学家们在行星运动方面已取得的经验的概括。

当然，开普勒还面临着从他的宇宙体系推算出天文表的任务，在经过无数次的计算后，他于1627年完成此项工作，即鲁尔夫天文表，它在以后几世纪内是太阳系天文学描述的基础。

认为由开普勒赋予形式的哥白尼体系不久成为十七世纪天文学家们的公共财富，这种想法肯定是错误的。这个问题是长期论战的主题，甚至于不能说，抵制哥白尼体系的天文学家就不如接受这个体系的天文学家，除了技术天文学方面的问题外，还有哲学方面和一般科学方面的问题，对于后两方面的问题继续发生了不同意见的激烈冲突。上文不曾详细述及这些情况，但在力学革新的章节中将予以追溯。

## 伽利略（1564—1642）

这位意大利科学家在物理学中的伟大成就，将在下章讨论；他在天文学史上也起到重要作用，因为他是首先想到用望远镜（大约发明于十六、十七世纪交替时期）观察天象的人之一（也许他是最早的一个）。1609至1612年间，他查明月球表面与地球的相似；他发现木星有四个卫星，金星有周相；他观察到土星外表的特殊性，他描述了土星的三重形式这种特性。

1610年他在《星的使者》一文中，报告了上述前三项发现。这事轰动一时，但它既引人羡慕，也使人怀疑。这些怀疑并非象当今所表达的那么荒谬。还没有一个人懂得望远镜的操作方法，而且伽利略本人是否懂得也值得怀疑。在任何情况下他都不曾企图证明他在望远镜里所看到的东西真正存在。上文已经提到对于光学仪器的怀疑，这里又再次表示出来。

伽利略还发现（可能在1610年）了太阳斑点，这使他卷入与约苏特、克利斯托夫、沙伊纳的激烈争论：是谁最先发现太阳黑子的。关于他发现木星的卫星也发生了同样的事情；德国天文学家西蒙·梅耶（或马里乌斯1570—1624）声称这是他的发现。这类争执对当事人来说可能很重要，但对我们则没有什么意义。现在看来很可能是这样的：当时望远镜已经发明，在不同国家不同个人的心里互不相关地产生了把望远镜转向天空的思想，而且在大致相同的时间在地球上不同地区作了同样的观察。

伽利略用望远镜所作的观察进一步坚定了他正在逐步成熟但不曾公开发表的关于哥白尼太阳系理论的真理性的信念，这一理论不仅是简化天文学计算的数学构想，而且是物理实在的表述。于是他开始公开鼓吹哥白尼学说。这样就导致宗教法庭的干预，于1616年宣布哥白尼理论为异端，并在《天体运行论》修订期间把该书列为禁书。由此产生并以1633年伽利略被迫公开宣布放弃对哥白尼学说的信仰而告终的斗争，此处不能详加讨论。

伽利略根据自己的观察所得出的并且似乎证实了哥白尼理论的那些结论，只对已经确信此理论是正确的人们来说才是一种证据。如果他的敌手们愿意的话，他们可以使新发现的事实和托勒密体系相调和。伽利略在其结论性观点中还应用了根据潮汐现象得出的论点；他从潮汐运动看到了地球双重运动（绕自身轴的转动和绕太阳转动）的清晰征兆。但他的潮汐理论从未得到人们的赞同。

## 天文学和光学

用望远镜作天体观测促进人们对新仪器的兴趣并导致对于它的操作的研究。因此，天文学间接地推动了物理学中一个重要领域的发展。

我们不拟讨论望远镜发明的细节。传统的说法把这项发明归于密德尔堡荷兰小镇上的一个研磨透镜片的工人约翰纳斯·利帕席（卒于1619年）。其他一些人指出，望远镜的原理在意大利科学家德拉·波塔多次出版的《自然的魔术》（1589年）的一版中已经提到。据说1590年意大利已制成望远镜，后来在尼德兰也出现了。它有一凸面物镜和凹面接目镜。在物理学中仍把它称为荷兰或伽里略望远镜。据说后来从尼德兰重新传入意大利，1609年引起伽利略对它的注意。

我们把望远镜的思想是否确系波塔提出的问题搁置一边。不论怎样，他在光学史上的地位都可由《论折射》（1593年）一书予以确立，在书中他给出了第一个透镜理论。这一基本仪器虽早已为人们所知晓，但却经常为光学研究者们所忽视。这样的说法并不奇怪：由于他不知道真正的折射定律以及视觉是如何形成的，因而他没有取得任何有持久价值的结果。

在开普勒的两本光学著作，即《对“威泰罗”(vittelo)的补遗，论述天文学的光学部分》(1604年)和《屈光》(1611年)中，首次提出了这些结果。在第一部著作中他发展了透镜和视觉的有

根据的理论。第二部著作特别详细地论述了望远镜。开普勒根据自己的理论研究，提出了物镜和目镜都是凸透镜的天文望远镜原理。他并不了解折射定律，但却成功地表述了透镜和望远镜的理论。这似乎不可思议。他相信，光线射入另一介质会偏离原来的方向，此偏离度与入射角成比例。如果用 i 表示入射角，用 γ 表示反射角，则开普勒反射定律可表达如下：

$$i-\gamma=\mu i \qquad (1)$$

由（1）式得出 $i=\nu\gamma$ （2）

而不是 $\sin i=\nu\sin\gamma$ （3）

但是，如果使用薄的透镜，且仅涉及与主轴线成小角度的光线，则（2）式可看作接近于（3）式。开普勒在其著作中讨论了这类情况。《"威泰罗"（vittelo）的增补》与意大利数学家莫罗利哥的《光的照射》一书极为相似。莫罗利哥长寿，殁于1575年，他的论著首次出版于1611年，再版于1613年，由克拉维乌斯注释，因此它一定比开普勒的论著早得多。看来这两人的发现无论谁依赖于谁都是不可能的，因此在这里又是科学成就同时产生的稀奇例子。这两位作者的理论都因阿尔黑森而逊色倒并不是因为这个偶然出现的同时发现。

# 第十章

# 十七世纪的物理学（1）

## 伽利略时期

## 引　　言

经过十六世纪下半叶一个时期的准备，物理学在十七世纪开始有了突飞猛进的发展。当时，物理学的生长点是力学，力学是关于运动问题的理论，它把静止当作运动的一种特例加以处理。力学为什么能成为物理学的生长点是很容易理解的。在关于无机界的自然现象的那些学科中，只有忽略了干扰因素（如摩擦与空气阻力），才易于理想化和适于进行数学处理。历史证明，一切科学都离不开数学方法。

在古代，当阿基米德推演杠杆原理时，就运用了数学方法。这为运用数学工具研究自然科学的可能性提供了令人信服的证据。在十六世纪，阿基米德的全部著作（第一版于1544年问世）已为西欧的科学家们所了解，他唤起了其他一些数学家，鼓舞着他们用同样的方法去研究力学。

物理学的其它分支，象热学、声学、磁学和电学，由于比力学复杂得多，研究起来需要更多的信息，因此当时还没有采用数学方法加以处理。这就是为什么当时力学能够作为介于物理学与数学之间（但更接近于数学）的一门独立学科发展起来的原

因，尽管它是物理学的重要基础，并且现在人们把它看作为物理学的一个分支。后来，力学再也没有失掉这种独立的地位。因此，为什么以下的章节将着重研究力学问题便不难理解了。

## 西蒙·斯台文（1548—1620）

在西欧，由于西蒙·斯台文的工作，力学的发展直接和阿基米德联系起来了。斯台文是佛兰芒人，住在尼德兰北部。1586年，他写了《静力学原理》一书，书中他首先为阿基米德的杠杆原理作了数学证明，这成为阿基米德推理的一种简化形式。他所阐明的杠杆的各种各样的应用归结为作用在同一固体上的平行力理论的完整表述。

再者，他是第一个证明斜面定律的人。在他以前只有杰·乃莫莱雷斯（原文128页）推演过这个问题。斯台文想象把一条细绳（图14a）挂在直角三角形ABC上，绳上等距离地串着十四个相同的小球，此绳可以沿三个固定点P、Q、R滑动。他提出了如下的问题：处于自由状态时小球环会呈现什么情形？如果它自动地运动起来，那么每一个球都将取代它前面那个球的位置。那么，环保持着初始状态，但实际上将处于不断的运动之中。*这就会导致永恒的运动，斯台文认为这是荒谬的，因此环一定处于静止不动的状态。即使挂在A、B之间的圆球发生移动，这种静止状态亦不会受扰。因此环的AC部分和BC部分将处于平衡状态（图14b）。如果假定AC与BC这两部分分别凝聚成重量为$G_1$与$G_2$的两球，它们仍然位于原来的斜面上，并用通过位于C的定滑轮的绳子连接起来（图14C），那末，平衡状态将仍然保持不变。这两个球的重量分别与斜面$l_1$与$l_2$的长度成比例，平衡条件是$G_1 : G_2 = l_1 : l_2$，这样，他发现了斜面定律。

---

* 为了避免当环运动时，小球与固定点P、Q、R的碰撞对运动产生阻碍作用，最好用无限纤细的串珠代替挂有十四个球的环，整个实验（纯属想象）就理所当然地被认为处于理想的条件下。——原注

这样，处于高为h长度为1的斜面上的重物G就与一个大小为$P=\frac{h}{l}G$、作用方向与斜面平行的力所平衡（图14d）。斯台文在图14e中标出此力。




图14　斯台文的球环图解

这样，至少在两力互成直角的情况下，引进了力的三角形；如果一个重物放在斜面上，那么垂直向上的力G（它当然能与重量为G的物体相平衡）便可以由与斜面相平行的力P来代替。但是，没有令人信服的理由导致把力的三角形法则（或平行四边形法则）推广到力取任意方向的一般情况。借助于这个法则可以圆满地解决具有一个固定点的固体的平衡问题。

斯台文《静力学原理》的第二部分是讨论如何确定重心的。这个问题和阿基米德也有联系，不过斯台文又把讨论简化了。在《论称量》一书中，他运用静力学理论去处理各种各样的实际问题。

他对落体理论的唯一贡献被收入这本书的附录。附录记载了他和杨·考乃兹·达·格鲁特（著名大法官胡格·格鲁提斯的父亲）合作在德尔夫特所作的旨在验证亚里士多德落体理论的实验。亚里士多德认为落体通过给定距离的时间与落体的重量成反比。他们从三十英尺的高处同时丢下两个铅球，其中一个的重量是另一个

的十倍。他们发现，重球落地的时间并不是轻球的十分之一，相反，两球落地的响声听起来好象是同一个声音。这个实验被记述在1586年的《静力学》一书中，因此，必定是在这一年或稍早些时候作的。尽管早就有人对亚里士多德的落体定律提出过异议，但在十六世纪，就用专门实验加以检验，证明它是错误的并记载入册，是很有意义的。

《流体静力学原理》是和《静力学》同时出版的一本书。斯台文在这方面也继承了阿基米德的工作。他在书中为浸在液体中的固体受到的向上的浮力所遵循的规律作了新颖的证明，和阿基米德所作的证明一样，它只在亚里士多德物理学框架中才是有效的。斯台文运用这个原理导出了与当时流行的观点相反的流体静力学定律(液体对容器底部的压力与容器的底面积、液体的深度、比重成正比，因此一般说来，不等于液体的重量)。他用一种仪器演示了这个定律，这种仪器迄今在物理学教学中仍被使用着。

斯台文用荷兰文写了《静力学》和《流体静力学》这两本书。他的目的是想以此证明，本国文字和当时通用的语言拉丁文一样，也是进行科学研究的良好工具（按照他的看法甚至优于拉丁文)。当时有一批学者，如意大利的列奥·巴提斯塔·阿尔伯提，英国的罗伯特·理考德，德国的阿尔伯来希特·丢勒等等，他们分布于所有文明的欧洲国家中，也象斯台文一样企图使本国语言文字成为科学的工具。斯台文非常善于发掘和创造纯荷兰语的技术词汇来代替拉丁文词汇，这对荷兰语的发展产生了强有力的影响，这种影响至今仍是明显的。

斯台文最深远的动机是他期望科学成为各阶层的人们都能掌握的东西并组织一切有理性的力量进行科学研究。这是因为他清楚地预见到科学对人类的重大作用，因此试图竭尽全力来促进它的发展。

很遗憾，当时除在几个低地国家之外，没有人知道他的著作。这些著作被国际上了解只是在1608年它们被译成拉丁文收录在

《数学论文集》中，1634年又被收入阿尔伯特·盖莱德编辑的《数学著作选》中，因而才得到了广泛的传播。这时斯台文已经去世了。

## 伽利略（1564—1642）

斯台文已为力学的发展提供了新的动力，但是只有伽利略才使包括力学在内的整个自然科学发挥更巨大更广泛的影响。伽利略与斯台文是同时代的人，只是稍年轻些。在十七世纪头几十年，这位意大利人可称为是科学史上的中心人物。我们不能费笔墨去描述伽利略非凡成就以外的事情，不能追溯他在比萨大学期间思想发展的令人感兴趣的过程：开始他是那里的一个大学生，后来成了那里的一位教授，在他老年之时，出版了两本伟大的著作，这两本书为他在科学发展中的特殊重要性和他在人类一般文化史上的声誉奠定了基础。因此我们将首先讨论这两本伟大的著作：

(1)《关于两大世界体系(托勒密的和哥白尼的)的对话》，佛罗伦萨，1632年。

(2)《关于两种新科学（力学和运动的位置）的谈话与数学证明》，莱顿，1632年①。

这两本书的最主要的内容出现在《谈话》的《第三天》与《第四天》中。其中包括了他关于落体与抛射体的明确的运动理论。在《第三天》中他给自己提出的任务规定了界限：他将摆脱长期以来关于落体运动及其加速度的原因的争论，集中力量尽可能精确地确定这种运动的过程并用数学语言来描述它们。因此，他把自己限定在运动学处理的范围内，而避开任何动力学方面的理论。他这样做，并非因为他认为动力学问题是可以忽略的，而正是因为它们的极端科学重要性。只有精确地弄明白落体运动的过程才可能成功地发现引起落体运动的原因。

① 此处原文有误，应为1638年。——译者注

他把下面这个似乎有理的假定作为研究的出发点：落体运动是匀加速运动，这意味着它的即时速度与从开始下落算起的时间成正比。他的理由是：大自然作任何事情都采取最简单的方法。这句话在当时和后来都是科学界常用的箴言。速度增加的最简单的方式就是与时间成正比。(伽利略没有提及，在他思想研究发展的早期，他象萨克森的阿尔伯特(原文125页)一样，曾经设想落体的速度与通过的距离成正比，那时，他显然认为这是比较简单的)。

后来，伽利略借助于图解法，以与奥里斯姆稍有不同的方法获得了麦顿定则。伽利略的公式用现在通行的符号可以表示为：$St=\frac{VoVt}{2}t$。也就是说，从静止点开始作匀加速运动的物体通过给定距离所需要的时间与该物体以某一特定的速度匀速通过这一距离所需要的时间相等，这特定的速度等于匀加速运动物体的初速度与末速度总和的一半。

这个公式表明，落体通过的距离与时间之平方成正比，并且由此可以得出，落体在连续相等的时间间隔内通过的距离成连续奇数比。伽利略认为后一种表达特别有意义。在十七世纪和稍早一些时候，其它关于落体的定律也都常采用这一方式加以表达。因此，列奥纳多·达·芬奇认为落体在各个连续相等的时间内通过的距离成连续整数比。

以后，伽利略希望检验这些关系式并由此验证他最初的假定。然而，由于自由落体运动得太快，不能直接测量它通过的距离和所用时间的比。他考虑用沿斜面向下、速度比落体运动慢的运动予以代替。"具有相同的末速度的假定"确定了自由降落与缓慢下落之间的关系，这个关系表明，当静止的物体沿不同倾角的斜面从同一高度降落时，他们到达斜面底部时具有相同的速度。这个从数学上导出的落体定律后来被斜面实验所证实。验证实验所用的斜面的倾角做得足够小，这样就可以把运动时间延长到所期望的程度。

这个定律可以由如下的实验加以验证。让一个金属球在一个光滑的斜槽内滚过不同的预定距离，再对各个所用的时间加以比较。时间的测量是由从水桶小孔中流出的水的多少来决定的。伽利略指出：距离之比与时间平方比之间没有明显的不同。但是他没有给出观测数据。

我们之所以详尽地讨论《谈话》中《论自然加速运动》这一章的头几页内容是基于以下两个理由。首先，是为驳斥至今仍然广泛传播的关于伽利略对落体运动处理的两个错误见解。其一是，当他考察了由测量所得到的落体通过不同的距离所用的时间值以后，他发现距离与时间的平方成正比。其二是，由于落体运动是在不变力的作用下发生的，所以他得出落体的加速度必然是不变的结论。第一种错误的观点来源于如下奇怪的想法，认为现在通行的物理学初等教学中被认为易于接受的观点，也代表着物理学发展中的历史事实。第二种观点源于牛顿的《原理》中的表述。但它明显是错误的，因为在伽利略时代，落体运动动力学尚未为人们所知晓。在这里，十七世纪力学的发展成果与它的起点被混为一谈了。

理由之二是我们想向人们介绍并使大家清晰地理解伽利略当时使用的研究自然科学的方法，这种方法现在被称为假说——演绎法。这种方法的主要内容是：从最初的假设出发演绎（以完美的数学形成）出一些结论，然后再检验这些结论。如果这些结论被证明是正确的，那么，先前的假说就可以暂时被认为是有效的。因此，作实验并不是为了得到启发（看看会发生什么现象），而是为了证明演绎所得到的结论（弄清楚演绎的出发点是否可以接受）。至于最初的假说是如何被发现的则无关紧要。伽利略关于大自然作任何事情都尽可能采用最简单方法的信念同其它信念一样都是合乎情理的。当然，认为在大多数情况下，这个假说或多或少地反映了人们意识到的经验的本质这也是有道理的。

伽利略在《谈话》中应用了这一方法，但没有加以说明。在

其它地方（如在其《分析者》一书中），当谈及这种方法时，他把这个过程的第一个阶段，即形成假说阶段称为分析的方法，而把推演出一些可以用实验验证结论这一阶段称为综合的方法。

我们可以简要地提及一下《第三天》的其它内容，它包含了大量的数学命题，这些有关物体沿垂直平面下落或沿斜面下滑的命题，表现了巨大的创造性与高度的才能。但只是偶然提到物理学新的基本内容。由于他的开创性工作，力学立即从它的母体物理学中分离出来，并且走上了独立发展的道路。

在物理学中有重要意义的一点，必须提及。在《第三天》的命题23的附注中，伽利略指出一个沿某一斜面从给定的高度下落的物体，能沿另一斜面上升，这时，它所获得的速度就是它的初速度。他指出，这个物体将上升到原来的高度。事实上，这个结论与具有相同末速度的假设是一致的，而且在实验验证中也早已使用了这一结论。这是一个利用单摆演示的实验，当单摆经过垂直位置时，在悬挂点下面稍低一点的地方插上一个水平的钉子。这时可以看到，如果摆线在运动的过程中不受阻力，摆锤将会沿着新的路径上升到原来的高度。这个见解后来被理解为地球重力场中能量守恒定律的一种特例，这时，地球的重力场被假定是各向均匀的。

《第三天》的第二个命题的附注，严格地说是一个运动学问题，却要对末速度相等的假设作动力学证明，这是相当混乱的。由于先前没有提到任何动力学的公理，这个证明与《第三天》的体系不可能协调起来。事实上，这本书的第一版中并没有这项内容，是后来搞出来插入第二版中的。这个冗长的证明试图把假设变成已被证明的命题，是没有什么说服力的。唯一可采纳的结论是亚里士多德的物理学对伽利略的动力学观点产生的影响，一直比他经常采取的同亚里士多德的争论态度要强烈得多。

在《谈话》《第四天》中，他详尽地研究抛射体的运动，所用

的方法与在《第三天》中研究落体运动所用的方法相类似。假设抛射体以某一水平初速度被抛出，他发现抛射体的轨迹是物体不受重力时所作的匀速直线运动和水平初速度为零时匀加速运动的合成。因为在第一种情况下所通过的距离与时间的一次幂成正比，而在第二种情况下通过的距离与时间的平方成正比，因而所得曲线的纵坐标与横坐标的平方成正比，也就是说该曲线是抛物线。正象开普勒的头两个定律的表达式那样，十七世纪科学仍然应用着古代人获得的数学成果。

《第四天》还有一些与数学有关的问题，这里不能详加讨论。但它们却引起了一些同《第三天》一样的评论。

在《谈话》《第三天》与《第四天》中，伽利略以无懈可击的数学形式(这也是希腊人的遗产)所证明的结果，早在发表之前，就是他思想中所固有的东西，因为在《对话》中已经有了许多其它运动学命题，尽管没有加以证明。

从科学的观点看来，《对话》的价值肯定低于《谈话》，但是在处理问题的明白清楚以及在人类文化史上的地位等方面却超过了《谈话》。伽利略为了继续捍卫哥白尼的学说才不顾1616年宗教法庭的裁决（原文162页）写了这本书。结果他采用了对话讨论的方式来表达哥白尼与托勒密两大体系的争论。如果对话的参与者对支持和反对两大体系的论点作公正的评述，那么当读者被两者之一的正确性说服时，作者是不会受到责备的。伽利略是否已经达到他的目的是一个没有解决的问题；事实上，他没有获得成功。正象宗教法庭指出的那样，整个著作是以表面上漫不经心的评论掩盖着对哥白尼体系的彻头彻尾的抗辩，他的体系不可能是正确的。这些评论是嘲笑而不是在表达见解。因而，宗教法庭禁止这部著作并召伽利略前去解释。这就开始了1632年著名的审判，这次审判在1633年 6 月22日以伽利略正式宣布放弃哥白尼学说而告结束。

我们不可能去讨论这一令人不快的审判的全过程，也不能详

尽地描绘这次审判对整个欧洲造成的影响，以及它对那时（以及很久以后！）许多人对罗马天主教会态度所起的作用。我们最感兴趣的是伽利略运用自已的科学观点驳斥用当时的物理性质否定哥白尼体系的争论时采用的方法。

这些争论主要是关于地球运动的问题，而这些问题几乎全部起因于古老的关于惯性的概念（原文39页）。下面将给出几个例子。如果地球自西向东转动，（因为必须假定天体自东向西的周日运动是地球运动的结果）那么一个垂直向上抛出的物体就会在抛出点的西边落下来，因为在它上升与下落的过程中地球已经向东运动了一段路程。由于地球转动的速度比云彩和鸟快得多，这样就永远也看不到云彩和鸟的向东运动。枪弹向西飞行的距离要比向东远，因为在第一种情况下，它运动的方向与地球相同，而在第二种情况下，它运动的方向与地球相反。最后这一条论据已由第谷·布拉赫提出。

很明显，受过现代科学教育的人都会指出，这些推论有一个共同的错误：这种错误的看法认为，当一个物体与另一个运动的物体（两者原先是相互接触的）相分离时，就会立刻失掉那一个物体传给它的运动。根据现代力学的观点，在无外因时，一个运动着的物体不可能停下来，就象一个静止物体不可能动起来一样。物质的惯性指的就是，除非一个物体受到外来的原因即外力的影响，那么这个给定的物体所获得的速度是不会改变的。古代人的惯性观点仅仅适用于物体的速度是零的特殊情况。

在十七世纪初期，惯性的定义才逐渐从特殊情况扩展到一般的情况。这种进步主要是由于伽利略在《对话》中不倦的开导造成的。在《对话》中，他用许多有启发性的事例说明，任何物体的速度如未受减弱，则保持不变。当一个从转动着的地球上被向上抛出的物体作上升与下降运动时，它将仍然具有与它位于地面时相同的水平速度。因此抛物者将会看见该物一直处于空中竖直方向。这与行驶着的船上的人垂直上抛一个球体的情况一样。他能

在船上的同一个地方重新接住该球。这对于伽利略来说是显而易见的，因而他认为没有必要加以验证。法国哲学家比埃尔·伽桑狄（1592—1655）是第一个在行驶的船上作这类实验的人。

他必须加以反驳的另一种异议是，没有什么东西能够证实所断言的地球运动。他所持的观点（也可以称为相对性原理）是：当整组物体作联合运动时，在这组物体内发生的运动现象是不改变的。

伽利略没有用正确的方式表达惯性与相对性原理。这两个原理在十七世纪的进程中终于获得了正确的形式并在牛顿力学中作了确定的表述。伽利略的惯性定律仅仅涉及地球上的运动现象，指出当地球上的物体没有受到干扰影响时它会在水平面上维持其速度不变。但是他所说的水平面是指以地球的中心为中心的球面。因为在小距离范围内这种球面可以认为是平面，因而伽利略的结果与牛顿的结果相当一致，例如在水平抛射物弹道的推导中，由水平初速度所产生的运动被认为非常近似于直线形。相对性原理的情况也差不多。在牛顿力学中，相对性原理涉及的共同的运动是匀速直线的转换，而伽利略却没有对其性质加以限定。相对性原理对他所考虑的一些现象实际上也是没有影响的，因为这些现象持续的时间短。

以上所述指明了哥白尼与开普勒所捍卫的太阳系的日静理论同伽利略所表述的理论之间的巨大差异。前两个人用数学天文学的观点考虑它们，并且以此改进了对天体现象的运动学描述。伽利略以物理学家的身份处理这一理论：他批驳了如果他不把自己的理论当作一种数学诀窍而当作宇宙间物理现实的表达时可能产生的异议。因此，在伽利略以前关于哥白尼体系的争论没有展开是不奇怪的。

## 伽利略的前人与后继者

环绕着伽利略名字的灿烂光辉确实使那些与他直接有关的先

行者与后来人的功绩都黯然失色。但是这些人的业绩也很引人注目，因此必须在这里书上一笔。

格奥芬尼·巴蒂斯塔·班纳蒂蒂是威尼斯的一个数学家，在他的著作《多种多样的沉思》（1585年）中用批判的头脑和可以独立验证的方法考虑落体运动问题。在一项机智的辩论中他指出，在真空中由同一材料组成的不同的物体在同一时间内应当落下相同的距离。这与亚里士多德关于最重的物体降落得最快的论述正相矛盾。因为如果亚里士多德的观点是正确的，那末当一个重的物体与一个轻的物体连在一起时，复合体一方面将具有两者的平均速度（落得慢的使落得快的减速，而落得快的使落得慢的加速）；而另一方面，它的速度将比重的物体的速度还要大些（复合体比两个组成物体中较重的那个物体还重）。这个完美的有说服力的推理常被错误地归功于伽利略，而且由于忽略了两个物体必须由相同的材料组成这一条件，因而描述不确切。

格奥芬尼·巴蒂斯塔·巴利阿内是热那亚的贵族，1638年出版了《论重物的自然运动》一书，这本书在1646年又重印了一次，印数很多。他对真空中一切物体的降落速度都相同的解释表明他已洞察到质量与重量成正比。另外，他不把惯性定律局限于地球上的水平运动，而认为此定律具有普遍的用途。他企图用动力学的方法处理物体在不变的动因作用下的运动情况。然而，这一切使他更接近于列奥纳多的落体定律而不是更接近于伽利略的落体定律。

爱劳格里斯塔·托里拆里（1608—1647）是著名的意大利数学家，他的名字和大气压力定律联系在一起。在他的著作《论自由落体和抛射体运动》中，许多地方都对他的老师伽利略的《谈话》的论述作了补充，例如，他使对抛体轨迹的论述扩展到适应于具有任意方向初速度的情况。为此他采用了惯性定律的一般公式。也是他首次为静力学公理确定了明确的表达式：两个联结在一起的物体不可能自动地开始运动，除非把他们的共同重心降

低。

我们对伽利略的前人与后继者的关注丝毫没有贬低伽利略在十七世纪科学发展史上极其重大作用的意思。这样做完全是出于公正心。既然在编述思想发展的历史时，通常都要提到那些在这种发展中起过作用的人们的名字，（设想一种仅涉及思想发展的编年史也是可能的）那么荣誉应当给予那些应该得到它的人们。另一个理由是，一个伟大的先行者的贡献并不都象最初看来那样是全新的东西。加之，他也往往未能看到自己发现的伟大意义。只有他的学生们才能在以后认清全部结果，他曾为他们指明了道路，而他们则找到了正确的表达。

## 威廉·吉尔伯特（1540—1603）

这一章几乎谈的都是力学问题，在结束它之前，有关伽利略同代人对物理学其它分支的贡献的某些问题，至少在后面不再论及的范围内需要说明一下。英国医生威廉·吉尔伯特对于十七世纪的自然科学具有巨大的影响，这种影响来自他在1600年出版的《关于磁石、磁体和大磁体地球的新生理学》。

吉尔伯特使用了十三世纪波特洛斯·波列哥雷努斯在《关于磁的通信》中汇集的知识，也应用了以后在航海中获得的经验。十五世纪末人们已经知道了指南针的磁偏现象（通常称为磁差），在十六世纪人们已经知道指南针的量度在地球不同地方的变化。也已经知道了磁倾现象。测量磁偏与磁倾的仪器已被制造出来，同时也写出论述它们的书。例如罗伯特·诺曼写了《新的吸引力》一书(1581年)；并且附有威廉·波罗作的附录。

吉尔伯特把整个磁学从经验转变为科学。他既得益于航海经验，也得益于自己关于采矿与冶炼的广博的实际知识。他属于那些既通晓科学又通晓技术的人才，这些人对近代物理学的建立作出了巨大的贡献。

《论磁》一书首次对基本的磁现象作了经验性的处理，这样

处理除了数学表达式之外，与现行的自然科学初级教科书没有本质的差别。令人惊奇的是，他没有把磁棒而是把磁球当作研究的主要工具。他把它们称为微小的地球，这说明了他的选择。他宣称地球是一个大磁球，磁球是一个小地球，这种新观点对于他同时代的人的影响是很大的。他因此也认为球形就是磁体的自然形状。

吉尔伯特在他的著作中发展了关于磁与静电现象的广泛理论，但它们仍然完全属于经院科学的范围。尽管在许多方面都表现了新的实验科学的精神，但是还没有进步到接近伽利略的程度。伽利略在没有确切知道已经发生了什么事情之前，他不接受关于事物本质及自然现象最终原因的思辨。与伽利略不同，吉尔伯特没有求助于数学。

吉尔伯特的著作立即在同时代人中取得了成功。伽利略通常不大注意别人的著作，但是，在《对话》中他却详尽地探讨了吉尔伯特的著作。吉尔伯特的想法多次被开普勒在《新天文学》中以及斯台文在《论天体的经历》中采纳。当时有一种力图把物体间的相互影响解释为磁作用的倾向。实际上，这种倾向现在仍然是显而易见的。

## 弗兰西斯·培根（1561—1626）

英国哲学家弗兰西斯·培根是否应该算作科学史上的重要人物，现在仍然是一个有争议的问题。一方面有人指出，他对于科学的发展没有作出任何积极的贡献，无论他或别人用他推荐的科研方法都从未获致成功，而且他对其它一些研究者的实际功绩毫无所知。而另一方面，他的拥护者却坚持，由于他关于科学和科学的社会重要性的思想，特别是他表达自己思想的卓越方法，使得他对人类思想的发展起了很大的激励作用。

这两种观点都是正确的。如果培根的名字和他的全部著作被排除于科学史之外，那么连一个简单的概念、一项简单的科学成

果也不致于丢失。他认为，在研究自然科学时，把按某些预定的方法搜集起来的经验排成表，几乎可以自然而然地从中得到关于自然现象的答案。这个方法从来就没有获得什么成果。他没有赞赏哥白尼，也没有肯定评价吉尔伯特。但他的许多有名的箴言被众多的探索者奉为研究中的指导原则，其中也包括那些最伟大的学者。此处我们仅仅提及一下培根那句被本书引作标题的名言："要征服自然，必须服从自然"。他不断地指出实验方法的无与伦比的重要性。十七世纪英国物理学的发展可以说就是他的思想的产物。勒奈·笛卡儿（1596—1650）是不轻易赞赏其它人的，但是他却以十分赞赏的口吻写文章谈论培根。克利斯蒂安·惠更斯（1629—1695）的研究方法与培根完全不同，也把培根当作新科学的奠基人。这两个人都知道培根极端的经验主义是片面的，他的列表法是无效的。然而，他们仍然很尊敬他，这是十分有意义的。

实际上，培根不是那种随便可以忽视或贬低的人物，特别是由于他非常明白自己所处的地位，他不要求加入创造性探索者之列。他自称只是"一个鼓吹者"。

我们早已熟悉培根对于科学研究未来发展的两个方面所预言的前景。这是培根所特有的，再次说明了他的历史重要性。但是在十七世纪初期，科学与技术之间对于集体合作研究的极端必要以及密切关系很少有人觉察。第一种思想在他的乌托邦《新大西岛》中得到了发挥，书中他勾勒了建立学者们的合作团体（梭罗门宫）的计划。第二种想法多次见于他关于以工匠、手艺人为一方，以科学家为另一方建立紧密联系的必要性的讨论之中。工匠们的手艺会因运用科学方法变得更有成效。而学者们则从实际经验中提高他们的水平并得到许多有益的建议。这样最终对于社会是有益的。人类的生活条件将得到改善，疾病将得到治疗，痛苦将会减轻，寿命将会延长。

培根关于科学的重要社会功能的思想是当时少数有远见的人

物所共有的。这是一种古代人一无所知、中世纪人也很少了解的新思想。培根与斯台文，以及后边提到的笛卡儿，他们分享了这一荣誉。后世人称颂培根是由于他属于那些提出了科学的社会功能并雄辩地宣扬这一思想的人。

# 第十一章

# 十七世纪的物理学（2）

## 笛卡儿时期

### 引言

在十七世纪早期，数学对自然科学的重要性日益普遍地被人们所承认，这并不仅仅是由于数学的实用价值。这个时期的一些最伟大的研究者开始认识到，数学具有重要得多的基本功能，它不是那种实用的但是可以忽略的辅助学科。他们表达了这样的信念：物质世界结构的同一在本质上是数学的，因此这个物质世界和人的数学才能自然是协调一致的。伽利略最喜欢的座右铭是：大自然这本书是由数学的语言写成的。他曾用不同的话表达这一思想。开普勒相信上帝在创世时遵循了数学的原则，并且使人们的心灵也能掌握这些原则的意义。这与他的毕达哥拉斯——柏拉图式精神是一脉相承的。正象耳朵是用于听声音，眼睛是用于看颜色一样，心灵是用来理解数量的。因此自然科学应该运用数学方法加以研究。笛卡儿继承了这些思想，并且逻辑地得出了结论：科学与数学在本质上是同一的。自然知识同数学知识一样，都是由人的心灵按同一途径创造出来的。

笛卡儿四十一岁时，首次发表了自己的某些研究成果。先出版《关于更好地引导人们的理性和寻

找科学真理的方法的谈话》（以后略为《方法谈》）作为前言，接着是《折光学》、《气象学》、《几何学》等三篇论文。《方法谈》同时也是笛卡儿哲学的导言，在思想文化史上具有独立存在的地位，是十七世纪哲学的经典著作之一。

在1637年发表的一些研究成果当然早得多。笛卡儿受完了青年贵族应受的教育之后，1618—1619年间他在布列特时，在荷兰北部七个联省的最高行政长官毛莱斯王子的军队中服役。此时，他已经致力于科学研究，并且似乎已经形成了解析几何的基本思想。大约在同一时期，他在《几何学》中进一步阐发了这一思想。

## 比克曼与笛卡儿

在布列特时，荷兰学者伊萨克·比克曼是笛卡儿的合作者。比克曼是一个神学家、医生兼蜡烛制造商，后来成为多得来奇拉丁学校的校长。他对自然科学深感兴趣，有把观测和沉思所获得的一切都记入日记的习惯，写成《日志》一册。这本《日志》长期湮没无闻，但在二十世纪初期又被重新发现并且出版了现代版本可供阅读。

在《日志》中，1618年11月23日到12月26日期间，作者记载了他和督·波隆先生（这是笛卡儿根据他的一处封邑对自己的称呼）合作在力学领域中所作的发现。

在讨论笛卡儿以前，我们将首先描述这个发现。这个发现与落体定律的推演有关，它的重要历史意义经前几章的论述已经清楚了。推演的方法不象伽利略那样纯粹是运动学的，而是动力学的。它考察了一个不受向上作用力的物体在假定不变的重力作用下所呈现的运动状况。

比克曼在《日志》中多次明确地表述了推理所依据的物理学基础。它们以他初始的术语表述如下：

（i）重力是短促的拉力。

（ii）无论什么物体一旦运动起来，只要它不受阻碍，将永远运动下去。

陈述（i）表达的概念是：把一种持续不断的力看作是周期几乎等于零的冲撞力。这个概念在十七世纪后半叶经常被人们成功地加以使用。陈述（ii）体现了新的惯性思想。这个思想最终代替了亚里士多德的基本原理，即：一切运动着的物体都是由其它什么东西推动着的。

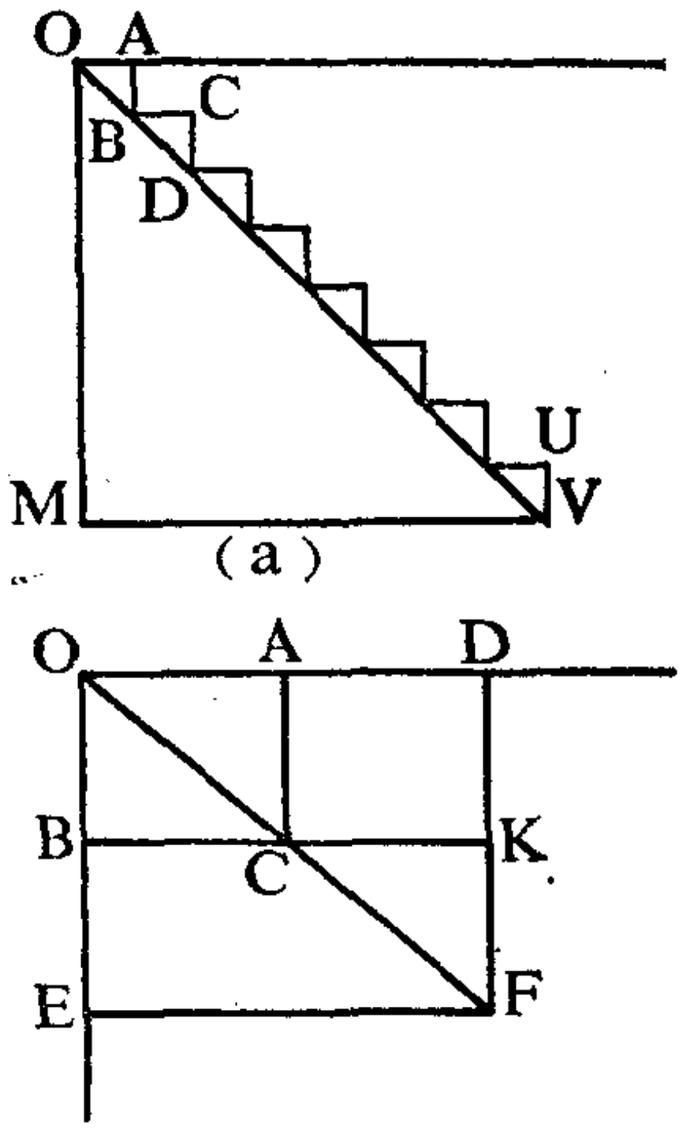



图15　落体定律的动力学推演（伊萨克·比克曼）〔见原文185页〕

推理过程如下（图15a）：

假定重力对自由物体的第一次短促作用产生速度W，而且在第二次短促的拉力到来之前所经历的时间等于τ。用OA表示W，用OB表示τ，那么面积OACB就代表了在第一个周期内通过的距离。第二短促的拉力又引起了速度W，但是由于第一次短促的拉力引起的速度W仍然存在，所以，现在速度是2W＝OD。在第二个周期内通过的距离可以用面积KBEF来表示。循此前进，我们可以发现（图15b）在时间OM内，重物下落的距离就等于折线OABCD……UV下面的面积。如果τ近似等于零，那么这个面积就近似等于△OMV的面积。这就立即表明，重物下落的距离与下落时间的平方成正比。

精确地分析这份摘记，并结合比克曼《日志》中其它地方的叙述和笛卡儿以后所写的著作，就得出了下面似乎是很有道理的结论：比克曼是推理的物理学基础的主要创始人；在拉·福来齐的教会学校受过良好传统教育的笛卡儿发明了图形表示的数学工具，这使得有可能过渡到极限的形成。

比克曼一生都坚持记他的《日志》,但从未出版过。因此,他在实际的自然科学史上象达·芬奇一样，没有获得一席之地。这是一件憾事，因为他的《日志》清楚地表明，在他那个时代，他的科学思想在许多方面都处于领先的地位。应当记住，上述推演方法创于1619年，亦即在伽利略的《对话》出版前十三年。

## 笛卡儿

现在我们来论述笛卡儿本人，看他是如何力图实现一直萦绕于他脑际的想法的，这就是把自然科学当作数学加以处理。从他的形而上学的系统中得出的一个概念（要不然本书不会涉及这个系统）是：物质的本质仅在于广延的几何特征，只有那些空间广延的才是物质。看起来我们通过感觉经验知道物质实体除了占据空间这种数学特征外，还有许多物理特征，比如颜色、气味、味道、硬度、柔软性，发光度等等。但是这一切词仅仅意味着人的精神对空间元素的存在以及同它们接触所引起的感觉与反应。这些反应纯粹是主观的，因而也是不能用科学实验加以验证的。除了物体的形状与大小这两种几何特征，再也没有比研究决定物体相互运动状况的运动的量更适宜的物理研究课题了。因而，自然科学唯一地与这些“第一类”本质有关，而与上述“第二类”本质毫无牵连。严格地说，物理实体仅仅具有第一类性质。

因此，物理学是关于运动的空间形式的学说，它是关于静止的空间形式学说也就是几何学的引申。所以，象几何学一样，物理学应当可以从先验的公理中推演出来。除了数学，人类的头脑又创造了物理学。由于在空间元素的形状与运动方面数学公理以同样的方法使自己毫无困难地适用于一切物体，可以根据纷杂的物质世界想象出许多可能性，所以，认为人类的头脑构造了各种形式的物理是较好的说法。

经验或者经验式的研究，仅是一种手段，它确定所有上述可

能性中哪一种在自然界真正实现。在这里，笛卡儿发现了与科学中新的经验倾向的联系，起初他好象完全摆脱了这种联系。

笛卡儿并没有完全独立地提出他关于宇宙的图景。可以说它最终是由和伽利略那样的分析与综合相结合的方法而形成的。只不过第一种分析方法被削弱得几乎不可能辨认出来。为了发现用作过程第二部分推理出发点的假说的表达式，不需要感觉经验。

在这里不可能详尽地考察笛卡儿把他的原理付诸于实践的方法，而只能非常概括地加以讨论。

物质与空间的同一性立即导致下面一些重要的结论。(i) 世界是无限的；(ii) 世界中到处都充满着相同的物质；(iii)物质是可以无限分割的；(iv) 真空，也就是说不包含任何物质的空间，在逻辑上是矛盾的，因而是不可能的。

所产生的首要问题是，观察到的世界上不同物体的差异是怎样形成的。尽管可以想象用一些表面把空间分成各个部分，但是这些部分并不因此就相互隔开。只有当这些物体开始作相对运动同时又保持它们的形状时，才产生了分离。共同的运动或者共同的静止证明是引起空间元素积聚和它们差异的区分原则。可以想象，当上帝创造世界时，把空间分割成具有千差万别的形状和大小的部分，然后再让这些不同的部分相互作各种各样的运动。这一切实际上都发生了。如果不把世界想象为一下子被创造出来的，而是逐渐发展成现在的样子，那么就会得到一幅清楚的画面。这样就可以理解空间元素三个量级的产生：最初存在的微粒一部分彼此碰碾成为小球，一部分通过互相止息粘合聚成一个个较为粗的物质单位。在前一过程中物质块形成，它是由以高速运动着的极细小微粒填充于其它两个另外的物质单位之间的全部空间内而成。（这就是人们如何自然地倾向于用一种东西来表达概念，事实上空间当然就是物质块）

当这个过程完成时，（恰当地说从一开始就形成了以下的局面：所谓第二类物质的球状粒子由于自己的离心力倾向产生了巨

大的旋涡，迫使那些极小的第一类粒子或稀薄物质粒子向中心移动。它们形成了球状的聚合物：太阳和恒星。因此太阳和每一恒星的周围都有一个第二类物质的天空或旋涡，因此这些第二类物质也被称为天体粒子。那些比较粗些的第三类物质形成了地球与行星，它们之间的空间充满了第二类物质，这些第二类物质之间包含有稀薄物质，而且也被统称为天体物质。地球上物体的物质的量（为了方便的缘故我们用现代的语言称之为质量）是由包含于其中的第三类物质的粒子的总量确定的。此量就是平常观测到的量减去充满天体物质中间的空间总量。

自然界的一切变化都是由这三类空间元素的运动组成的。这些运动的初因是上帝的共同聚合，是连续地保持运转作用。上帝使所有运动的总动量，也就是质量与速度的乘积保持不变。关系式：$\Sigma mv$＝常数，成了自然界的根本规律。这起源于上帝的不变性，尽管它希望整个世界是运动的，但应尽可能是不易变化的。

然而，这个根本的规律决不能确定自然事物的进程。还有三条其它定律作为第二类指导原理而起作用。第一条定律的基本思想是，没有外来的原因，空间与物质元素不会有任何变化：物体的形状与大小，物体在通常的静止中与其它物体联结或不联结或者由于相对运动而与其它物体分离的状况，以及物体本身运动或静止的状况，没有一种是由于内部原因自发变化的，仅仅由于其它物体的作用而变化。因此每一物体都有一定的个性与稳定性，它们把物体与理想的几何形式明显地加以区别。第二条定律包含着惯性原则：在第一条定律中假定的维持运动的倾向，在这里进一步被定义为在任何时刻以原来获得的速度继续作匀速直线运动的努力，不考虑运动的性质。

尽管一切运动必然存在于物体填满的空间的周而复始的进程中，然而第三条定律只处理两个物体相撞的情况，而不涉及在周围引起的后果。这是物体可以作用于另一物体的唯一方式，（毋

宁说看来是对另一物体的作用，因为事实上一切运动都受上帝的影响和传递）这条定律包含了笛卡儿物理学的基础。这条定律也是从第一条定律假定的维持静止或运动的倾向出发的，这种倾向现在被描绘为对静止或持续直线运动的干扰的抵抗能力。这种持续的倾向依赖于物质的量，也就是质量。根据第三条定律，一个运动物体不可能使一个处于静止状态具有巨大质量的物体运动起来。然而，由于总动量是不能变化的，第一个物体碰撞后就以原来的速度沿其它方向继续运动。另一方面，如果这个物体的质量比处于静止的那个物体大，它就能克服后者的静止倾向而带着它一起运动，由此它失掉的一部分动量恰等于它传给另一物体的那一部分。惠更斯后来指出了这些碰撞定律中所包含的基本错误。只有在动量被考虑为矢量的情况下，物体碰撞时的总动量才保持不变。

在笛卡儿主义的宇宙图景中，环绕太阳与恒星的天体物质的旋涡占据重要地位。环绕太阳的旋涡带着行星一起运动，就象可以看见木片在水的涡流中旋转一样。当然这些涡旋着的天体物质的质点全都具有离心力，这种力表现为对外层的压力，而且立即放射至整个空间。这种压力可作为太阳与恒星放射的光线而观察到；然而不应把这些放射理解为这些天体的作用，它只表明，光线是由环绕这些天体的天体物质旋涡引起的。

我们将不进一步研究笛卡儿那非常详尽的、关于各种各样旋涡相互关联的原初位置的描述，关于它们互不阻碍地旋转的方法的描述，关于复合运动的描述——在这种复合运动中，稀薄物质在旋涡中进行交换，关于行星起源的描述。我们也将不去研究他以自己丰富想象力对地球上多种多样的物理与化学现象所作的同样详尽的论证。他在解释这一切时除运用了物质粒子的形状、大小和运动之外，再也没有运用其它的假设。

然而，应该有一个例外，就是以运动（包括重力）的作用来说明的现象。这是一个具有根本重要性的变化。除了少数几个孤

立的例子外，直到那时重力仍被想象为物体本质的一部分，通常被当作为达到自己的自然位置或与一较大的相似物体相联合的内部倾向。这个概念现在突然起了变化：一个空间元素本身仅仅具有形状、大小和运动，在这些性质中没有一个是促使沿一确定方向运动或联合成为一个统一体的推动力。然而，如果看来是存在着这样一种推动力，就必须用外来的影响加以解释。他又一次借助于天体物质，它们在地球周围形成一个旋涡，带动地球使之作周日转动。这些物质总是力图沿切线方向逃逸，这就相对于旋转的地球形成径向离心力。

相对而言，石头几乎不含有什么天体物质，因此它的密度大。空气中含有大量的天体物质，因此它的密度极小。当石头在空气中处于自由状态时，石头的位置被位于它下面的一定量的空气所代替，在这种情况下，天体物质的离心倾向就得到满足，因此石头向下运动；当它被握在手中时，这种天体物质的推动力就体现为重力。

现在已经大致勾画出了笛卡儿系统的轮廓。我们应当简短回顾一下上述论述的数学本质。不应把这理解为笛卡儿解释自然现象的推理是用数学公式表示的，这一点后面会变得很清楚。相反，在任何地方他都没有给出数学说明，在表述机能的相依性时，他倒一贯是很含糊的。在太阳的旋涡中，天体物质粒子旋转的周期同它们的尺寸大小都随着与太阳的距离增加而增大，但是没有告诉我们这些增量的数学关系式。他甚至没有企图去确定行星的旋转周期与它的密度、以及它与太阳的距离之间的关系。数学的内容在于整体的公理化结构，在于不可争辩的基础的假设，在于对现象所作的演绎处理。后面我们将会看到，只有到了惠更斯那里，才相当正确地用公式作数学处理。

笛卡儿的物理学通常被指为是机械论的，这是指除了运用与力学有关的概念外（几何学的概念，如形状大小也出现在力学中，因为力学是数学的分支），他没有采用其它原理解释物理学

问题，而运动问题又是笛卡儿物理学中具有独特地位的课题。笛卡儿主义仅仅认识到那些用上述概念能够把它们解释或描绘成自然界中实际存在的东西。

除了“机械化”这个词的原来意义是“借助于力学”之外，笛卡儿给了这个词另一层含义，这种含义下文经常要专门提及，也就是说它是一种可以用机械模型加以模仿的工具。

他明确指出，除了承认在尺寸上有差异之外，自然物体与人工产品之间无其它的不同。在前者中会出现的现象在后者中也会发生，只不过发生在人们能够看见的较大规模内，除此之外，一个走动的表和一棵正在成长的树之间是毫无差别的。由于这个原因，那些谙熟自动机制造的人也一定是看破自然现象真实情况的最适宜人选，因为这意味着猜测它们背后的机制。由此，笛卡儿宣布了一个解释自然现象的原理，这个原理统治了物理学很长时间，即解释说明都应是能被直接证明，而且能使熟练的工匠用模型去模拟自然现象。

以上所述看法可能有助于消除似乎存在于他的先验-演绎方法（笛卡儿想用这种方法研究自然科学）和他经常表现出来的，对于经验式研究和技术的强烈兴趣之间的矛盾。

我们在前面已经看到，他指望实验能够具有确立演绎结构的理想世界与物理真实之间的一致性的功能，这样，上述矛盾已经可以消除部分。他断言工具的使用创造了一种令人满意的可以探索自然界隐蔽活动的安排场所，这就进一步减少了矛盾。如果我们考虑到他对于以科学为基础的技术在未来人类社会中的社会重要性期望很高，那么这一矛盾就一起消失了。这思想构成了他与培根共鸣并且欣赏培根的基础，并不是由于他们在哲学上有任何一致。他未能分享英国哲学家关于探索自然界的方法的看法，但可能他从来也不知道这些看法。

在《方法谈》最后一章中，笛卡儿对他所期望的自然科学的未来发展美景作了详尽的描述，自然科学将使我们成为自然界的

统治者和占有者。这不仅使我们能够从地球的产品和所提供的一切美好事物得到更多的利益，而且能使我们保护和保持健康，这是最大的幸福。

笛卡儿对医学总是非常感兴趣，他认为，除了与精神之间的神秘的相互作用这一例外，（这是他相当轻率地不予考虑的问题）活人的机体对他来说是一架机器，这架机器的运转可以用力学加以解释（动物没有灵魂，它们的躯体也是机器，它们没有意识，而且与表面现象相反，它们也没有感觉）。医学与克服机体内部机制的紊乱相关联。医学就是安排和操作这种机制的知识，因此，除了机械论的物理学与化学之外，医学科学还需要研究生理学。这种观点对医学思想产生了巨大的影响，后来人把生命体看作一个物理化学过程的观念，是这种观点的自然延伸。

笛卡儿对医学的高度评价清晰地反映在他描绘的各种科学互相联系的著名图景之中。他说："哲学象一棵大树，形而上学是它的根，物理学是它的干，其它所有的科学是从干上长出的枝。这些科学可以总归为三大类：医学、机械学和道德学。"我们将不去探讨精神和物理学是如何互相联系起来这一问题。

在对笛卡儿的自然哲学有了一个总的印象以后，我们将简要地讨论一下他对物理学的具体贡献。他最主要的贡献是光学，他极其有力地推动了这个领域的发展。

《折光学》是附在《方法谈》后面的三篇文章之一。在《折光学》中，他用演绎法给出了光线折射的正弦定律。在他以前，荷兰的数学家威尔伯罗特·斯涅尔（1591—1626）已经用经验方法发现了这一定律，我们不能断定笛卡儿是否知道这一结果。

如果他忠于自己的原理，他就会从关于光的本质的哲学理论开始他的推演。而实际上，他把一束光线穿过平的界面进入较密的介质比作子弹以巨大的速度$V_1$斜着穿过具有可透介质的界面。他假设（图16）速度$V_1$与$V_2$以一定的比率增长；而且它沿着界面

的分量是不变的。而后，他证明如果入射光线和折射光线与垂直线成的角分别为$i_1$和$i_2$，就得到关系式：

$$\frac{\mathrm{Sin}i_1}{\mathrm{Sin}i_2}=\frac{V_2}{V_1}$$

这不但发现了斯涅尔折射定律：

$$\frac{\mathrm{Sin}i_1}{\mathrm{Sin}i_2}=n_{12}$$

而且发现了折射率与光线在两种介质中的速度的关系：

$$n_{12}=\frac{V_2}{V_1}$$

下面我们会看到，直到十九世纪初期，许多物理学家都相信这是正确的。从现在开始我们将第三个等式称为笛卡儿关系式。

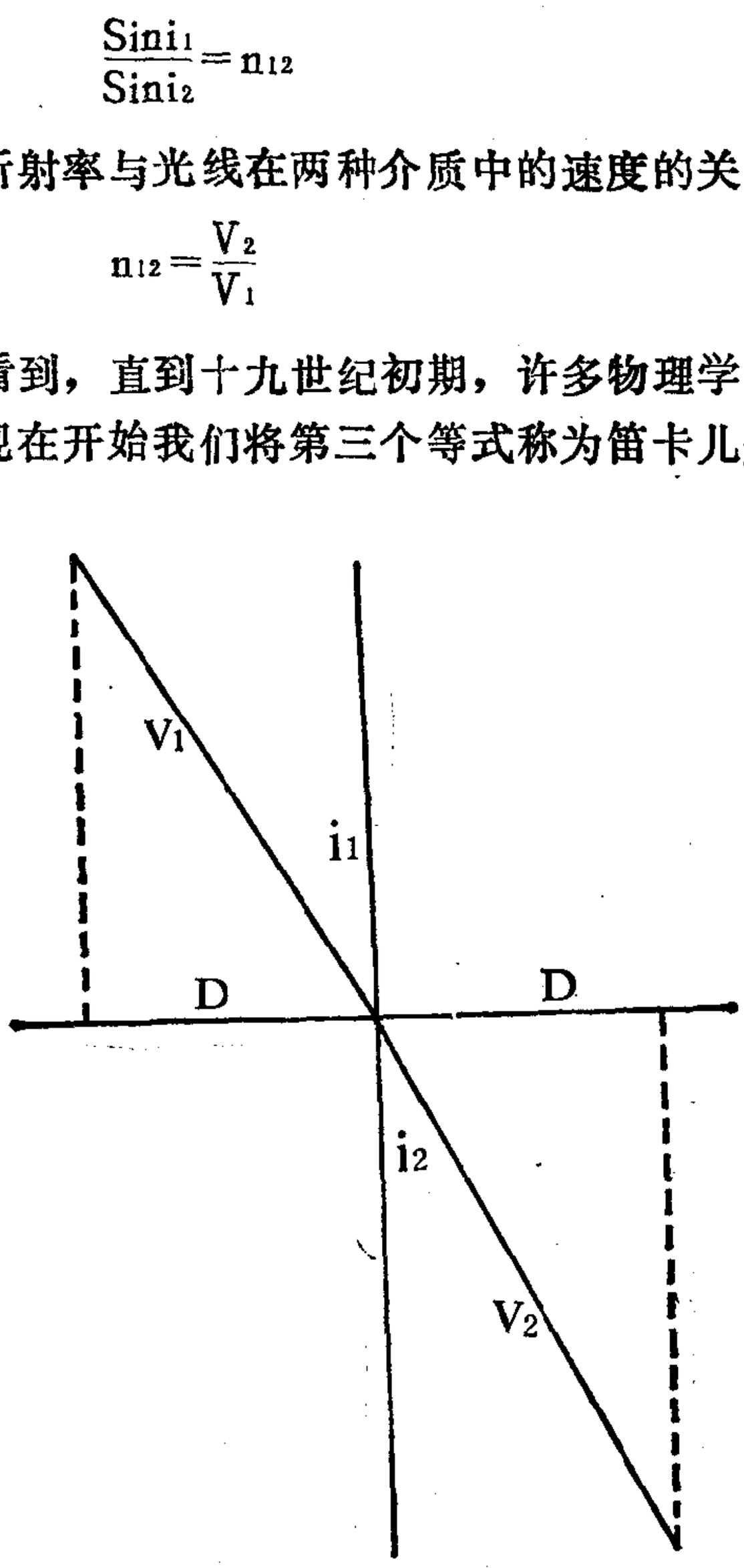



图16. 笛卡儿对折射定律的推演

除了在推演中他将光线与抛体的轨迹加以比较以外，在《屈光学》中，笛卡儿进一步给出了两幅图画，帮助人们形成光的图解概念。在头一幅图中，视线被比作盲人用拐杖探路的途径。第二张画面，即所谓葡萄桶图，它把穿过透明物体的光线比作塞满被压榨的葡萄的大桶底部的小孔流出来的葡萄酒。在十七世纪，这三个概念都被反复地应用过。

在同一篇文章中，也发展了关于眼睛功能的扩展理论，文章论述了借助于透镜或者复合的光学仪器使人的视力得到改善，以及研磨镜片的技术。

在《气象学》一文中，笛卡儿发展了关于虹的理论。笛卡儿沿着第里希·冯·弗莱伯格等在十三世纪所开辟的、并由马库斯·安东尼斯·德·多米尼斯（1566—1624）在十六世纪继续开拓的道路，把主虹解释为两次折射与一次反射的结果，同时又用数学的方法推演出由虹与眼睛决定的锥体对顶角（作为它的角顶）的一半是42°。至于次虹，是由于两次折射与两次反射形成的。他用同样方法发现角度是52°。他长期研究颜色的起因，但是由于当时人们对颜色与折射率的关系一无所知，因此他的沉思并没有留下什么有持久价值的结果，对这一点不必感到奇怪。他的理论的典型特色是，他把颜色上的差别归结为粒子旋转速度的差异。粒子旋转最快时产生“红”的感觉，而当速度降低时，颜色就依次变成黄色、绿色以至蓝色。这种看法在十七世纪为许多科学家所赞赏。

在《屈光学》与《几何学》中，笛卡儿研究了椭圆型与双曲线型的折射面，并以照明用抛物镜对戈赖斯式显微镜进行了理论探讨，从而对光学作出了更大的贡献。

## 马林·麦山尼（1586—1648）

法国修道士马林·麦山尼的名字与笛卡儿的名字不可分割地联系在一起。他是与笛卡儿通信最密切的人，他使笛卡儿的原理

与其他科学家发生并保持联系。他为他同时代的人作了许多这样的工作，他的历史重要性主要也就在这里。在既没有科学期刊，也没有科学家的聚会的时代，通信是学者们之间联系的唯一有效方法。麦山尼在巴黎皇家广场（现在称为孚日广场）的简朴的修道士斗室，成为对于十七世纪三十、四十年代的科学生活起到了很大的鼓舞和促进作用的中心。

这种工作的重要性使我们有时会忽略麦山尼自己对科学的贡献。他的哲学与神学论文不仅促进从亚里士多德体系中解放出来，并且证明这种解放与基督教教义是不矛盾的；对科学的进一步发展，他同样也作出了确定的贡献，特别是在声学领域中。在他死后，他关于振动的弦的拉力、长度、粗细与所产生的音调高低的关系之经验定律仍然被认为是正确的。在他对声学所作的工作中，应当特别地提一下《宇宙的和谐》一书（1636—1637）。

## 皮埃尔·伽桑狄（1592—1655）

笛卡儿时代应讨论的最后一个重要人物是法国神父兼科学家皮埃尔·伽桑狄。他的值得称赞之处在于他恢复了古代原子论先前的荣誉，为自然科学开辟了一条新的道路。他在许多公开发表的文章中论证，德谟克利特、伊壁鸠鲁、卢克莱修斯（公元前95—55年）等人的原子论（在整个中世纪中由于与无神论的亲密关系而名声扫地，而且被视为是基督教思想家们所不能接受的）在本质上与基督教的教义是不矛盾的。他论证了原子论在解释许多物理与化学现象方面的用途。他与笛卡儿一样机敏，他设法用假设原子的形状、大小、位置、排列和运动完全地解释了整个自然界。他的解释对现代的读者来说是极为幼稚的，并且他经常想在理解宏观世界问题的情况时，把它视为在微观世界中不证自明的东西，但我们并不因此而低估由他的原子论观点产生的促进作用。

尽管伽桑迪关于物质的理论在许多基本点上与笛卡儿不同（他关于原子的假设与笛卡儿体系共同之处之少犹如原子运动所

处的虚空），但是在后来的物理学的发展中，这两种观点都被冠以粒子哲学的共同名称，并不加区别地加以使用，这并不牵强。尽管笛卡儿基于空间与物质的同一性被迫假设物质具有象早已赋予空间的无限可分性，这并不意味着人们应当能够实际上实现所想象的对物质作无限连续的分割。想象中可分而实际上不可分的粒子正表明它们与德谟克利特的原子具有相同的性质（德谟克利特的原子在想象中也是可分的）。此外，仅含天体物质的空间对第三类粒子的运动毫无阻力，这样，这种空间就与真空难以区分了。

正在成长着的一代物理学家和化学家，从粒子理论中看到了他们各自学科取得进步的可能性，他们一点也不考虑下列事实：在笛卡儿与伽桑迪观点的一致中忽视了许多细微的差别（对此，这两位思想家一定会提出抗议的）。在十七世纪，尤其是英国自然科学的探索者们在自由地运用粒子假说时毫无顾忌，他们不考虑它们究竟出自笛卡儿或伽桑狄。当然，还有另一个来源：在第二章（原文38页）讨论的关于自然界最小量的理论。由于忽视这种可能性，很容易去设想那些表述微粒理论观点作者身上的原子论影响。

# 第十二章

# 十七世纪的物理学（3）

## 惠更斯时期

在上一章中我们已经看到，由于诸如培根、笛卡儿、伽桑狄等思想家们的活动，研究自然科学的总的哲学和方法论框架如何被创造出来。在任何可以提及的真正进步之前，需要用确定的经验和数学资料对这个框架加以充实。这个任务，在很大程度上被本章所讨论的科学家们完成了。

### 布雷斯·巴斯卡（1623—1662）

布雷斯·巴斯卡是人类文明史上最伟大的人物之一，他杰出的天赋只有很少一部分贡献给自然科学；因此，如果只把他当作一个物理学家，他的形象就表现得非常不完整。本书的篇幅不允许我们去注意巴斯卡在其它方面的贡献，去注意他作为数学家所作的深入的工作，他和耶稣会人士争论时显示出的雄辩才能，他那深邃的感情和个人高尚的宗教观点，以及所具有的文学天赋。他死后才以《感想》为题发表出来的一些为基督教辩护的短文和草稿，至今仍然被人们以各种文字加以传诵，属于法国文学的不朽杰作之列。

他作为一个物理学家的工作，开始于1646年，那时托里拆利1643年作的关于大气压的实验以及用大气压力理论解释该实验的新闻传入法国。他立刻着

手在各种不同的条件下重复托里拆利的实验，以便验证后者所提出的解释。在1646年到1648年这一段时间内，他完成了这一工作。1648年他在多姆山上作完实验验证，它证实了根据大气压力理论得出的推论，托里拆利管中的水银高度在山顶要比在山脚下低一些。

现在的读者在孩童时就学完了这一切，因此，让他们正确地评价巴斯卡的研究价值，并且明白他的这一研究正象他关于圆锥曲线的数学发现、他的《感想》和《与外省人的通信》一样，充分表现了他性格的基本特征，是非常困难的。只有那些使自己充分适应于巴斯卡时代的思想、知道那时关于气压现象的其他解释、懂得巴斯卡在山上所作实验的结果决不是他同时代的物理学家所预料的结论的人，才能贴切地评价巴斯卡的这项研究。只有在这时，人们才能形成一个明晰的概念，巴斯卡运用这个概念成功地驳斥了所有反对大气压力理论的论据，系统地排除了一切流行的错误观点，证实了压力理论的一切推论。

在奠定了空气静力学的基础以后，他把它与液体静力学结合在一起，形成了单一的学科——流体静力学。在他死后出版的著作《论液体平衡与气体物质的压力》(1663年) 中对这一学科作了充分说明。上文与《关于液体平衡的重要实验的报告》(1648年) 都是科学史上的经典著作。

巴斯卡的所有物理学探索都反映了他对所应用的假设—演绎法的极端严谨的看法。在一个假设被经验验证以前，他拒绝把它当作除了幻想、随想和想象以外的任何东西，至多看作为美丽的理想而已。这可以说明他对笛卡儿关于自然界的奇异解释的怀疑态度（尽管在原则上他接受笛卡儿关于自然界的机械论的概念）以及他对托勒密、哥白尼、第谷·布拉赫三大世界体系的争议所持的最大限度的保留态度。只有那些对他的思想方式仅有表面上了解的人，才会对这种态度感到惊奇。这些体系对他来说仅仅是具有相等价值的三种假说，他只有凭新的事实才能对它们作出选

择。他这种严谨的思想使得他在《与外省人的通讯》的第十八封信中对耶稣会人士严厉尖刻攻击，因为他们加罪于伽利略。

## 十七世纪的实验物理学

巴斯卡使压力计列为物理学仪器。在十七世纪早期，这类仪器中已包括望远镜，不久复式显微镜也加入了这个行列。下一个重要的收获是空吸泵。这是奥托·格里凯（后来称为冯·格里凯）在马德堡发明的，1657年，耶稣会人士卡斯帕·绍特的《液体与气体动力学》一书公布了这一发明，同时冯·格里凯在他的著作《马德堡新真空实验》(1672年）中，详尽地讨论了有关它的设计与应用。他把这一发明应用于各种场合，包括高度超过十米的水压计，使用这种水压计在德国进行了第一次大气压比较测量；马德堡气枪（由部分真空操纵）；轰动一时的马德堡半球演示。顺便提一下，此项实验在拉提斯堡的议会中的表演似乎不是在1654年，而是晚些，在1657年。

冯·格里凯的研究并没有局限在气体力学的范围内，他设计了起电机，其中由旋转着的硫磺球的摩擦而产生静电。他还从事宇宙论问题的研究。

绍特书中关于冯·格里凯研制空吸泵的消息激发英国学者罗伯特·波义耳(1627—1691)去设计同样的装置。他的工作得到年轻的罗伯特·虎克的协助，后者后来作为皇家学会实验的总管而成为著名的实验家。在其后几年中，波义耳用他的空吸泵作了大量关于空气压力以及有关稀薄空气中的现象的实验。

这些试验都详细地记载在他的《关于空气的弹力及其影响的物理—力学新试验》（1660年）中。正象题目所显示的，这本书中所讨论的主要内容是当时被称之为空气弹力的问题，特别是空气的体积随着外界压力的减小而增加的问题。应当明白，在那个时候，还没有把气体压力解释为运动着的分子对容器壁的碰撞效应。波义耳讨论了其它两个概念，按照第一个概念，弹性归因于

气体粒子本身；按照另一个概念，弹性来自笛卡儿所述的天体物质的运动。

在波义耳的《关于空气的弹力和重量学说的答辩》中，空气的弹性第一次得到了定量的处理。在这本书中，他驳斥了对他的空气压力实验的评论。为了消除已经表现出来的关于空气的重量与弹性是否能大得足以承受托里拆利管中的水银柱这一疑问，波义耳指出把一定量的空气装入U形管密封的短端，而另一端较长又是开口的，这样，短端内的空气就能够与开口端内高得多的水银柱相平衡。

他的通讯者之一，理查德·汤立（十七世纪后半叶）提出被封闭的空气的体积与压强互成反比。波义耳进一步用实验证明了这一假设；他把一根管子插进很深的水银槽中，实验表明，上述比例也适用于小于一个大气压的压强。这样，他就发现了至今仍以他的名字命名的、关于运动现象范围以外的第一个定量的自然规律，它具有巨大的历史意义。

在描述他的一个实验时，波义耳发现，一定体积的封闭空气被加热时，它的压强增高。他没有进一步注意这一现象，更没有定量地检测它。他似乎没有花费很多代价去考虑气体现象量的特征。在他那个时候，定量的自然科学进展甚微。

这里，我们仅仅把波义耳作为物理学家来加以研究，我们将在第十三章中讨论他在化学发展中的重要地位。

我们不可能再去研究他关于基督教与自然科学关系的颇有趣味的论文。这个问题在他那个时代是一个爆炸性的问题。他的观点背离了当时正得势的倾向，但从他的一本著作的题目看来，他的观点是正确的。按照当时的惯例，标题是一个简短的内容摘要，此书的标题是：《基督教徒学者：*表明一个人醉心于实验哲学，有助于而不是妨碍他成为好的基督教徒》。

---

* 十七世纪通行的对实验哲学家的专门称呼。——原注

波义耳当然也是十七世纪英国繁荣的实验科学的中心人物。培根关于把自然科学与技术结合起来研究的呼吁已经产生了效果。向着这同一方向的推动力也来自其它方面。早在1600年以前，就存在着一种把学者们的理论科学同工匠、仪表制造者和水手等人的实践知识结合起来的努力。然而在牛津和剑桥大学中，却没有见到把数学与科学教育和实际结合起来的愿望。私人的事业激励并诱使象亨利·沙维尔爵士（1549—1622）这样的人设立了沙维尔几何学与天文学教授职位，这个职位几个世纪以来是由各色各样出类拔萃的学者们担任的。由于商人们的支持，在英国枢密院倡议下，1588年在伦敦设立了数学讲座，委任托马斯·胡德讲授。除了数学以外，他还教授天文学、大地测量学与航海术。在以航海为业的国家里，由于航海活动日益扩大，对航海术这门课的需要十分迫切。在英国，胡德和他的同事们，以及爱德华·赖特的著作《发现和纠正航海术中某些错误》（1599年）满足了这种需要。葡萄牙的彼得罗·努尼斯（1502—1578），尼德兰的西蒙·斯台文(1548—1620)和彼德路斯·布兰修斯（1551—1622）等人对此也作出了贡献。在这方面，格雷山姆学院也发挥了重大的作用，它是在1575年由托马斯·格雷山姆爵士在伦敦建立起来的，但是到1598年才开始工作。有时它被称为英国的第三大学。七种讲座包括物理学、几何学、天文学，这样，数学与物理学的课题也得到了适当的阐述。为伦敦市民开设的讲座由与航海家和船舶建造家有联系的教授们讲授。那些有科学思想的人在格雷山姆学院的聚会有力地推动了十七世纪英国科学的发展。

相似的科学中心相继出现，例如，在瓦丹姆学院院长约翰·威尔金斯(1614—1672)指导下在剑桥成立的“天形学院”，许多著名的学者如克利斯托芬·雷恩爵士（1632—1723）、托马斯·西德纳姆（1624—1689）和罗伯特·波义耳等人都是它的成员。

在王政复辟以后，在这些各种各样的团体的基础上形成了皇家学会，并且在1662年由查理二世钦准。它的指导原则是培根的

经验主义观点，这反映在下面皇家学会的题铭中：勿奉任何人为神明。意思是：不能把任何权威的话看作金科玉律）。

皇家学会在1663年有了虎克这样能够得心应手地进行实验的天才人物，在他的协助下，做了非常重要的工作。它准备验证一切声言与推测，包括一些目前被认为是不值得自寻麻烦的验证实验。

早在皇家学会成立以前，意大利的齐曼托学社已经在佛罗伦萨成立，这个学社是由兄弟两人，斐迪南大公二世(1610—1670)以及他们兄弟后来的红衣主教里奥波尔德·美第奇（卒于1675年）资助起来的。1666年，法国科学院在巴黎成立，法王路易十四的大臣让·巴柏蒂斯特·柯尔伯特（1619—1683）从法国和国外为科学院邀集了一大批各方面的知名学者。

齐曼托学社只存在到1667年。然而，皇家学会与巴黎科学院则扩展成为对科学发展起重要作用的机构。直到十九世纪，它们以及在其它国家中仿照它们建立起来的机构才被大学所超过。

在转向本章据以定名的中心人物之前，有两本对十七世纪的光学具有重要意义的著作必须首先讨论一下。这两本书几乎是同时出版的。一本是《关于光、颜色、虹的物理数学》(1665年)，由巴洛哥尼斯的神父弗兰西索·马力亚·格里马第撰写的。另一本书名为《显微术或放大镜下微小物体的生理学描述》（1665年），是由上面已经提到的实验家虎克撰写的。

格里马第的非常详尽的著作是十七世纪光学知识的宝贵源泉，由于这些著作首次讨论了光的衍射问题，因而获得了持久的历史价值。正是他第一次引进了衍射这个词来表示他认为是光线传播中除了直进、反射、折射以外的第四种形式。格里马第描述了两组实验。在第一组实验中。一个带有一个小孔的屏幕摆在光束照射的路径上，透出来的光束投到另一个白色的屏幕上。观察到的现象被详细地记述下来，但显然作者还不能圆满地予以解释。在第二组实验中，他研究了一束从非常小的孔射出的光在行

进中遇到一个小的障碍物，并在屏幕上显示出阴影。

在他著作的其余部分，他研究了当时光学方面的一切重要问题：首先光是“物质”（独立存在的东西），还是“偶现”（其它某种物质的属性）。他倾向于相信，光是一种异常细微地分开的、运动速度极快的稀薄的流体，但是他欣赏这种理论的反对意见和欣赏似乎指明“偶现”理论的论据。他也讨论了关于反射、折射以及当时完全没有揭露出来的关于光与颜色之间关系的种种解释。

虎克的《显微术》一书对显微镜的发展和用显微镜观察都有非常重要的意义。这本书最早描述了用特殊设备照亮不透明物体的复式显微镜，并附有许多精心观察结果的图片。另外，这本书记述了使光呈现薄层色调的周围条件的系统研究，以及一种关于光与颜色关系的理论。

虎克提出了关于光的本质的波动理论。尽管没有获得有持久意义的结果，但是他确实有助于建立关于光的明确概念，他抗衡了赞成光微粒说的趋势。说到虎克，我们可能忽视他对弹性理论发展所作的贡献。他概括出了现在仍以其名字命名的定律；伸长与引起伸长的力成正比。

还有一些人讨论过诸多未获解决的光学问题。他们中间包括上面提到的多米尼斯，波希米亚科学家约翰纳斯·麦库斯·德·柯罗恩兰德，后者在1648年出版了一部名为《昭曼底斯》的著作，详细地研究了虹和颜色问题。还包括荷兰人伊萨克·沃西阿斯，他在1662年出版了《关于光的本质与性质》一书。

一种全新的关于折射的论述是由法国数学家皮埃尔·德·费尔玛（1601—1665）提出的。他运用计算的方法（其中的一项基本原则在他关于最大与最小量的理论中已经建立起来）证明（图17），当光线从介质Ⅰ的A点出发，在介质Ⅱ的界面上的C点折射后再到达介质Ⅱ中的B点时，从A经过界面再到B所需时间是一个最小量。在这里不企图对现象的原因作出解释，但是，由于作

出经典假设——大自然在某种意义上以最简单的方式发生作用，因而可以理解真正光路ACB与想象的光路AC₁B之间的区别。

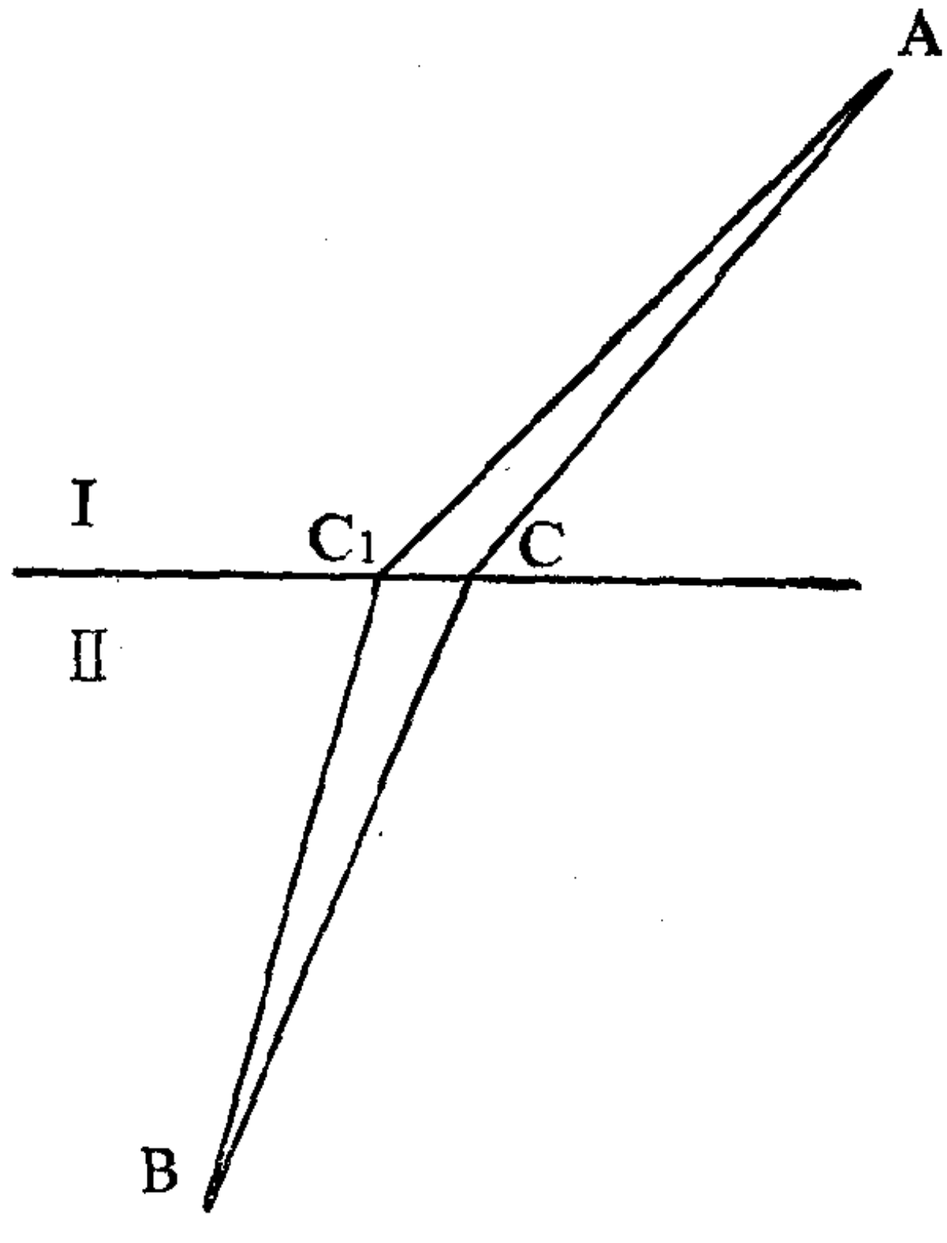



图17　费尔玛的最小时间原理

根据这一推导，费尔玛当然需要对光在介质Ⅰ与介质Ⅱ中的速度 $v_1$ 和 $v_2$ 之比作出假定。恰恰与笛卡儿相反，他假定 $\frac{v_1}{v_2}=n_{1,2}$ 我们称这个表达式为费尔玛关系式。

## 克利斯提安·惠更斯（1629—1695）

在被柯尔伯特邀请到巴黎任科学院成员的学者中，有一个是荷兰人惠更斯，他是巴黎科学院唯一的外国成员。他把自己当作阿基米德的追随者潜心于纯数学，因此而在欧洲享有盛誉，以后在十七世纪五十年代，惠更斯开始对自然科学与应用科学更感兴趣，在这些方面他的伟大的数学天才对他很有帮助。在他的兄弟康士坦丁的协助下，他自己磨透镜并把它们组合成望远镜使用。发现了许多天文现象。他在1655年首次观察到了土星的一个卫星，现在被称泰坦①；他解释了早已被伽利略注意到的土星外表独有的特征，好象有环围绕着它。1655年到1658年之间，他设计了一种摆钟，这种钟的运转是由一个摆调节的。这标志着钟表制造史的新纪元。以后，在科学与工程领域中，他都作了广泛的理论与实践的研究。

① 以希腊神话中大力士神命名。——译者注

惠更斯在设计摆钟的开始，就被要为测量海上的经度作贡献的愿望所激励，这是一个所有从事航海的民族所急需的问题。长时间以来，人们已知道要解决这个问题，就需确定本地时间与零度子午线时间的时差。无论如何，就是说在船上必须有零度时间，因此需要有能指示零度时间的钟。惠更斯一开始就企图用摆钟来达到此目的。当此路不通时，他研制了大量的自己原始钟的改进型，直到他终于发现了与游丝连接运转的平衡轮。从那时起，游丝开始在钟表制造中应用。这个发明也归功于虎克。

研究摆钟的理论首先要求摆动准确等时的摆，而不是象单摆那样近似等时的摆。对于这个问题，惠更斯找到的解决办法是：摆动点的轨迹应当是一段摆弧而不应当是一段圆弧。这可以通过让悬丝在两片摆线夹板间运动而实现。他之所以能发现这一办法，是由于他首先对多种曲线的渐开线进行了研究，研究结果表明，摆线的渐开线是一条与它迭合的摆线。

因为真正的摆并不是由一个质点悬挂在一条数学意义上的线组成的，而是一个绕着水平轴旋转的物质实体，于是他着手研究物理的摆，这就朝着固体动力学迈出了第一步。他知道如何用给定的物理摆去确定等时摆动的数学摆的长度。为此目的他不得不引进惯性矩概念。他的另一发现是物理摆的悬挂点与摆动点的可互换性的基本陈述。

在1673年出版的《摆钟论》一书中，他既研究了摆钟本身，也研究了以摆钟为基础的各种各样理论。而在1658年出版的《钟表论》一书中，他第一次对摆钟作了说明，不要把两者混淆了。

除了动手磨透镜、制造望远镜和显微镜以外，惠更斯终生都对透镜和光学仪器的理论感兴趣。他对球面象差问题特别关心。为了把这种象差减少到极限，他设计的望远镜物镜都具有很大的焦距，结果使这类望远镜长得目镜与物镜实际上不可能放在同一个镜筒内。这促使他去制造他的所谓空气望远镜，这种望远镜的物镜被固定在高处，而观察者则把目镜拿在手中。

他也把显微镜用于生物学研究中，但这方面他不如年轻的同代人安东尼·凡·李文虎克，后者由于自己特殊的观察能力，成为显微生物学的实际奠基人。应当提及的是，李文虎克不是用复式显微镜而是仅用自己磨制的小透镜进行观测的。

在《光论》中（1690年），惠更斯完成了一种光的机械论理论，这是他对物理光学的非常重要的贡献。在这本书中，他想象光在稀薄的介质中是脉冲式前进的，他用这个理论解释了光的反射与折射现象，他所采用的解释方法从此成为经典方法。他发现光在介质Ⅰ与Ⅱ中的速度 $v_1$ 与 $v_2$ 的关系式是 $\frac{v_1}{v_2}=n_{1,2}$，也就是费尔玛的关系式。此外，由于他假定两个波前在不同速度下前进，成功地揭开了冰洲石的双折射现象的秘密，这种现象是1669年由丹麦人伊拉斯谟斯·巴塞林在《关于冰岛晶体的双折射实验》一文中描述的。惠更斯的论述方法在现代物理学教科书中仍然采用。惠更斯指出：在以太中一旦有一个扰动生成，受到干扰的每个粒子都会成为新的扰动源，使扰动向一切方向扩展。惠更斯提出的这一原理在自然科学中的地位是永恒的。

应当注意的事实是，惠更斯的光学理论是脉动理论而不是波动理论。他强调指出，发光物体质点传给周围以太质点的脉动是非周期性的。因此波长与频率等概念是不存在的。如果假定没有振动的传播，那么把他的理论称为波动理论就没有异议。

现在人们很清楚，为什么惠更斯观测到的一些现象，象光线通过双折射晶体后所呈现的特征（后来被解释为偏振现象），对他来说是孤立的不可理解的。这不是因为他认为光的振动是纵向的，而是因为他根本不认为有振动存在。这也能解释他不注意格里马第发现衍射这一引人注目的事实，尽管我们知道他手头有格里马第的著作。

以上所述惠更斯所特有的理论与实践相互作用的观念，有助于在更高的科学水平上实现培根关于科学的社会功能的思想。

在纯科学领域内，惠更斯也为笛卡儿作了同样的工作，笛卡儿勾划出了大自然的机械论解释的纲要，但是没有能把这种解释建立在坚固的数学理论基础上，这一点惠更斯替他完成了。

笛卡儿关于光和重力的思想在惠更斯的《光论》和《重力起因的谈话》（1690年）中得到了具体的表现。在《曲线和幻日现象》（1663年）中，根据笛卡儿在《大气现象》中指出的原则，对气候现象作了论述，但论述水平要高得多。笛卡儿在《哲学原理》中描述的高度存疑的碰撞理论则被驳倒，而代之以惠更斯在《物体的碰撞运动》中的较为合理的理论，该著作惠更斯写于1656年，到1703年才出版。同时，其中的研究成果（无任何证明）已发表于《摆钟论》（1673年）中。

在后来的工作中，由于1668年沃利斯和雷恩的文章的发表，碰撞理论有了巨大的进展。但是清楚地表述两项力学基本原理并且应用它们也是非常重要的，这两项原理即：

（i）经典的力学相对性原理，伽利略是指物体系统的任意复合运动，这里仅涉及相关的匀速直线运动转换。并首次给出了精确的形式。

（ii）托里拆利公理现在被推广成如下的动力学公设：当一个由许多物体组成的系统内的每一个物体在给定的时刻利用它的即时速度垂直上升，而后保持在最高点，那么这个系统的共同重心就确定了，结果就是重心的实际高度，这个重心不因组成系统的个体的相互作用而发生变化。这个原理和假设与均一的地球重力场内能量守恒原理是等效的。事实上，假定有 n 个速度为$V_1$、质量为$m_1$、高度为$h_1$的粒子，垂心的实际高度是

$$\frac{\sum m_1 v_1^2}{2g}+\sum m_1 h_1 \over \sum m_1 。$$

这个常量可以表示为$\sum\frac{1}{2}mv^2+\sum mgh=C$，这与机械能守恒

的表达式毫无差异。

当轴系绕轨迹为圆的点旋转时，推导出作用于该点的离心力，这对力学来说是一个重大的贡献。这个推演过程载于《关于离心力》。这部著作和论碰撞的著作一样，尽管写于1659年，在1703年以前没有出版。然而，书中的结论在1673年的《摆钟论》中已经披露出来了。

## 行星运动的理论

从开普勒以来，在理论天文学领域内没有获得多大进展。他的不完整的天体物理学的思想，也就是对行星的运动作动力学解释的思想，仍然没有得到完成。与此相近的思想也表现在意大利医生兼物理学家盖伐尼·阿尔封梭·博雷利1666年写的《物理学推演的曼狄孙行星理论》一书之中，书中包含有木星和它的卫星形成一个小太阳系的理论。他认为行星的运动是由于不变的向心力与可变的离心力之间斗争的结果，但是，他没有用数学公式表达这个思想，也没有进一步发展它（因此，用巴斯卡的术语来说，不过是空想与幻想而已）。博雷利的《论碰撞》，对力学来说是非常重要的。他的《动物的运动》（第一卷，1680年；第二卷，1685年）包含有机械论生理学倾向，这部著作是机械论世界观发展的征兆。

在结束本章以前，有两个法国物理学家必须提一下。

爱米·马略特是一个神父兼物理学家，从1666年起就是法国科学院的成员。他对各种物理现象都十分注意。他的工作对于力学与流体静力学有很重要的意义，他比波义耳晚十八年再次发现了一定量的封闭空气的压强与体积之间的关系，因此波义耳定律更正确地说是波义耳-马略特定律。他独立地发现了这一定律；此外看来他对这个定律的基本意义比那位英国前辈有更深刻的了解。这个定律的实验证明论述在他的论文《论空气的本质》（1679年）中。在这本书中，他试图找出建立在这个定律之上的

用气压测量高度的方法。这个基本的物理学思想是正确的，但是由于数学上的困难，他未能如愿。

在他关于碰撞的著作《论物体的碰撞或撞击》（1677年）中，介绍了一种验证沃利斯、雷恩以及惠更斯推演出来的碰撞定律的仪器，并记录液滴测试的结果以测定空气的阻力。他的著作《论水及其它液体的运动》（1681年）汇集了在凡尔赛和坎特里进行大型水利工程建设时获得的经验，这对流体动力学是一大贡献。流体动力学是在他以前不久由伽利略的学生、意大利人伯纳德托·卡斯特里和托里拆利创立的。

法国物理学家兼工程师丹尼斯·巴宾曾在巴黎和伦敦分别当过惠更斯和波义耳的助手。在担任这种职务时，他改进了空吸泵。他在马伯格任教授时，根据惠更斯设计的火药发动机，制造了一台最早的活塞发动机。据说他也曾试图用这种发动机驱动船舶运行，在许多专门术语中，他的名字还与压力锅联系在一起。

# 第十三章

# 从炼金术到化学

在当代的图书馆中有一大批中世纪炼金术原本拖延至今没有公开出版，虽然它们的编目和内容提要近来已经可以利用了。随着印刷书籍的出现，在炼金术士和对于化学有兴趣的人们中间，各种思想和发现的传播变得容易了。化学资料和观测结果逐渐积累，到十八世纪末，定性的炼金术可以转变为定量的化学了。

## 晚期的炼金术士

第一批印刷出版的炼金术著作使我们接触不同炼金术士使用的秘密的记号、符号和术语。要想读懂这些原本，就必须仔细研究它们，因为每个作者使用的是他自己的术语，没有通用的“炼金术语言”。他们使用的符号常常是含混不清的，在许多情况下，超出了我们的理解范围。这些炼金术士想要实现化学化合物的衍变，他们认为这些化合物是由四种基本元素组成的，他们把成对的元素和肉体与灵魂、男性与女性相比较。他们用原始物质的着色说明形式与物质的统一，又把形式与物质的统一比喻为生命的诞生、后代的繁衍、太阳月亮、皇帝皇后的联姻。“哲人之石”的创造变成了“化学的结合”。祈神与祷告伴随着炼金术的操作，这种操作的准确时间是由占星术观测计算出来的，其中有

些操作甚至是由黄道十二宫规定的。

在印刷出版的炼金术著作中，流行最广的有些是著名人物的著作（或者错当他们的著作），如维拉诺瓦的阿那尔得（1240—1311）和雷蒙德·卢尔（1235—1315）的论文。这些著作中，有思辨的内容，也有关于化学实验的确切描述，但是由于缺乏纯净的化学药品，这些炼金术士常常不能得到相同的结果。从内容来说，最著名的炼金术著作要算是那些吉伯尔名下的书籍了（这个吉伯尔不是九世纪阿拉伯炼金术士亚伯尔·伊本·海扬）。最重要的是他的《完美大成》一书，这本书充分揭示了这位炼金术士的思想，用霍尔姆亚德博士的话来说，“他要进行的因为知识不足和前提根本错误而不可能做到的事情这一事实”使我们不能不重视他的洞察力，从根本上说，他是想要合成具有预定特性的化学物质，是现代化学家的先驱；他的失败，只是因为他缺少专门的资料和数据。

有一大批炼金术士我们是很了解的，如约翰·狄埃，狄格白爵士，亚历山大·赛通和丹尼斯·扎恰瑞。这些人的著作早就流传于当时的社会，他们是有名的“江湖术士”，目的在于赚钱而不是更好地了解化学现象。除了这些人以外，还有许多热衷于炼金术的炼金家和科学家，他们真正地努力想要弄清化学事实和检验别人提出的理论。这些人当中有波义耳和牛顿这样著名的人物。

## 物理学家批评炼金术学说

笛卡儿在他的《哲学原理》（阿姆斯特丹，1644年）一书中提出了系统的微素学说，他的目的主要是想解释物理现象。伽桑狄在《伊壁鸠鲁哲学体系》（巴黎，1649年）一书中把微粒物质解释为原子，原子是性质相同的、不可分的原始物质微粒，只是形状和大小不一样。他也提到“分子”，它是“很小的凝聚物，是由几种完美的、稳定的结合物形成的，人们很长时期以来把它看作事

物的种子，种子不是原子，但是可以分解为原子”。从德谟克利特原子论派生出来的理论，除了上述这些，还有其他类似的微粒理论，它们都反对当时占统治地位的亚里士多德的主张，反对他的物质是连续的观点、反对他的形式学说和元素与混合物理论。

从本质上说，波义耳主要是物理学家，但是他在《怀疑派化学家》(1661年) 和《形式与性质的起源》(1667年) 两书中，批评了亚里士多德的化学理论。他用实验事实说明，物体在加热的时候并不是统统分解为假想的“土、水、气、火”四种元素，而是分解为十分不同的、非常复杂的化合物。他怀疑上述四种元素是否能够说明这些现象，但是没有提出能够说明这些现象的元素表，也没有说明怎样才能确定某种物体是一种元素。波义耳认为，原子的“簇集”和集团在化学反应之后仍然保持原有的特性。但是并没有弄清原子和分子之间的关系。波义耳对于旧有的化学理论的抨击是有力的，却没有提出一个清楚的化学理论来代替原有理论。

波义耳相信元素衍变的可能性。有证据说明他进行过这类实验，还曾把“使贱金属变为贵金属的药粉”送给洛克和牛顿，但是后者并没有步他的后尘。虽然牛顿在原则上并不怀疑元素衍变的可能性，他研究过古代炼金术和冶金学的书籍，但是在实验室研究中，他没有找到一种有效的方法，可以把第一组成微粒和第二组成微粒（现代意义下的核与原子）分解出来，这样，元素的衍变就不可能实现。

## 新炼金术理论家

原子论者的批评很难动摇炼金术士关于四种元素、灵气、土和在中世纪炼金术中流行的其他实体的信念。炼金术很快就从“江湖术士”的炼金炉转向研究古代文献，进行宗教神秘主义的思辨。十五世纪末叶以后，新柏拉图主义、诺斯替教和卡巴拉神秘犹太教的理论形成了一股新浪潮，从意大利向西方传播。1670—

1690年间，牛顿工作的所在地、三一学院就是这样一个团体（剑桥柏拉图主义者团体）的活动中心。这个团体对于炼金术理论特别有兴趣，推动英国的出版商搜集和出版炼金术的典籍。阿许莫尔（1672—1692）写作的著名《不列颠化学大览》大概是这类文集中最出色的一部。由于研究这些典籍形成了新的炼金术理论，这种理论纯粹是思辨的，还受到罗马天主教会和基督教会的强烈影响。这些典籍，把金属的衍变和圣体的变化[①]、人生的不同阶段、婚姻的多产相类比，还用大量象征性的图画来说明这些看法。显然，这种趋势对于化学知识的真正进步影响是很小的。后来，玫瑰十字教派，共济会和其他十八世纪的人文主义理论吸收了这种学说，为后世保存了许多古代炼金术文献。荣格[②]说，现代心理学能够帮助人们理解这种神秘的化学符号、图画和隐喻，他的意见是正确的。炼金术士无论是自己进行实验，还是思考别人的实验，都会揭示出他们自己的心理状态和智力进步。

## 医药学的侍女

还有人从完全不同的角度攻击炼金术，这就是冯·荷亨海姆。他又名帕拉塞尔苏斯，这个名字人们比较熟悉。他曾经为弗罗本（著名的巴塞尔出版商，伊拉斯谟斯[③]的朋友）治病而被誉为妙手回春。后来，帕拉塞尔苏斯成为巴塞尔大学的医学讲师，在课堂上他讲授加仑的学说，猛烈抨击亚里士多德的观点。一年以后，由于他的讲授语言亵渎又过于刻毒，被巴塞尔大学解职。他在德奥两国流浪行医，写作了大量论文，一直到1541年逝世。

在帕拉塞尔苏斯看来，炼金术是处理“从不纯净物质到纯净物质”的技艺，因此，特别适合于制造医用化学药剂。当时人们认为，所有用作药物的自然产物都包含一种有价值的“第五本

① 指把面包和酒变成耶稣的血和肉。——译者注
② Jung（1875—1961），瑞士心理学家。——译者注
③ Erasmus，文艺复兴时代瑞士著名学者。——译者注

质”，但是这种东西因为混合了许多“杂质”而多多少少减弱了药力。化学家通过萃取、煅烧、蒸馏和分离，可以去掉这些杂质。医生此后不再依靠草药了（这些草药的使用是以古代希腊人的经验为基础的），他们应该首先请求化学家制备必需的浓缩形态的“活力”，以便入药。在帕拉塞尔苏斯看来，和消化过程一样，所有的生命过程都是化学过程，也就是某些化学物质通过自然的进化衍变为另外一些化学物质的过程。他认为这种进化过程贯穿在整个自然界。所有活着的或者表面看来是死的物质都是由神灵激活和引导的，而神灵又是受天体影响的。

这种理论的内容大都可以在卢尔及其学派的著作中看到，但是帕拉塞尔苏斯有许多自己的特点。他摒弃亚里士多德学派的四元素说，提出了三元素说，他认为，硫是代表颜色和可燃性的元素，汞是代表流动性的元素，盐是代表不腐和坚固性的元素。这三种原始物质不能从自然界中分离出来，但是它们在化合物中保持同一，使化合物具有一定的化学特性。这种三元素理论后来被帕拉塞尔苏斯的学生修改为五元素（粘液、汞、硫、盐和土）理论。但是这种理论和亚里士多德的理论有同样的根本缺点，这就决定了它也是要失败的。

在早一代的炼金术士中，已经有人仔细地检验所有的天然物质并且加以分类，帕拉塞尔苏斯推动了这种趋势。由于已经确立的化学实验很少，当时很大程度上仍然沿用古代亚述人的方法，也就是按照物质的外部特征或者（猜想的）天然来源进行分类。利巴乌斯和冶金学家、矿物学家阿格里高拉一样，对于理论不大感兴趣，但他描述了化学操作和化学物质分类。他写的《炼金术》（1597年）一书中，有关于化学家使用工具和煅烧、升华等操作的全部过程的准确描述。他给出了制备盐类、汞合金、金属灰等多种产品的配方，他把化学定义为“使混合物（复合药品）完善，通过分离物质从混合物中提取精华的技艺”。他对矿物所作的分类（如沥青、天然石蜡和树脂）说明了他很机智，具有敏锐

的观察力，其中许多分类现在仍然是成立的。

由于帕拉塞尔苏斯学派的细心观察和记述，出现了一大批化学药物手册，形成了我们经常谈到的医药化学。其中最重要的是1670年费伯列和1677年列麦里的著作，这两本书是现代实用化学教科书的真正始祖。更加具有实际价值的是，这个学派努力想要理解化学技师使用的酸、盐、碱的本质。

## 酸、碱和盐

塔钦尼乌斯（1666）是试图对酸、碱、盐的相互作用进行合理说明的第一个人。他认为当时人们已经很熟悉的许多工业化学物品和矿物是酸和碱的混合物。但是，正象波义耳听说，他的看法还是模糊不清的。后来，罗耶列提出了盐的概念，把盐看作是酸和碱（或强碱）的混合物，此时，这些物质的分类就准确了。当时已经认识了挥发性强碱“氨水”。十八世纪，人们注意研究各种“固定的”强碱。波特和马格拉夫分解了“矾土”（氧化铝），发现它是一种由明矾和酸形成的强碱。在1758—1759年间，马格拉夫从普通盐中成功地制备出一种固定碱；他证明这种碱就是矿物泡碱，但是由于包含着木灰和酒石而与强碱不同。后来，布拉克指出了强碱和弱碱的区别（1755），这就可以具体认识不同气体的特性，因为有一种气体(“固定气体”，即二氧化碳)是固定在弱碱之中的。布拉克的工作是重要的，因为他的工作若与当时流行的定性方法相比较，可以说基本上是定量的工作。

十八世纪末，为了生产硫酸、苏打这类基本化学产品而发现许多新的化学流程，化学技术得到发展，并开始进一步研究这些化学过程背后的东西。这就使人们在认识矿物和“土”的组成和特性方面有些进展，但是若干重要的反应仍然没有得到说明。

## 燃素延误了新概念

燃素理论似乎对于许多化学现象作出了简便的说明，但这种

学说是古代化学的最后形态。十八世纪是新的化学概念和燃素学说激烈斗争的一个时期。1669年，贝歇尔提出了一种理论，认为“油土”(脂肪土）使化学化合物具有可以燃烧这种特性。施塔尔把这个理论发展成更广泛的理论体系，用以说明氧化、呼吸、燃烧、分解等很多化学现象。燃素学说认为，物质的燃烧过程是释放燃素（贝歇尔的“脂肪土”),煅烧之后生成“石头样的”或“玻璃状的”残渣。关于这一点，康南特① 曾经说过:“设想每当用木炭加热矿物时，它就吸收‘金属化’元素，而‘金属化’元素能使土具有金属的性质，还有什么说法能比这种解释更加自圆其说呢?”如果我们把这个设想的物质称为“燃素”,冶金过程就可以这样“解释”:

金属矿＋燃素——→金属

（氧化物）（从木炭中得到）

木炭在加热时燃烧的过程，在“燃素论者”看来就是，燃烧过程中燃素从木炭中逸出而与空气相混合。他们把在空气中燃烧的物质说成是富燃素的物质。他们认为，燃烧过程在密闭的容器中不能持久的原因是，空气只能吸收一定量的燃素。当空气完全燃素化了，就再也不能支持任何一种物质的燃烧了。在这种空气中，既不能加热物质产生灰渣，也不能维持生命，因为在呼吸过程中，空气的作用就是从身体中去掉燃素。这种解释使每件事情都正好自圆其说。

到1740年，燃素理论在法国被普遍接受；十年以后，这种观点成为化学的公认理论。但是，阿拉伯人的记载早就说明，在燃烧的时候，金属的重量是增加的。雷伊和皇家学会早在1660年就同意阿拉伯人的观点，后来又弄清了其他一些事实。“燃素论者”不得不虚构证据；甚至说他们的燃素是有“浮力”、有负重量的!

对气体的研究（或者说对气体化学的研究）使情况发生了变

① Conant，科学史家、哈佛大学校长。——译者注



1332 57

化。范·海尔蒙特（1577—1644）创造了气体（gas）这个词，并且描述了性质不同的各种气体。十八世纪的化学家们发明了制备、收集和分析气体的方法。布拉克采用汞作液体，使要收集的气体从汞上面通过，代替当时（1750）大多数人惯用的水。正式分析这些简单气体物质的仪器，绝大部分是普利斯特列设计的。此后，布拉克制出了“固定空气”(二氧化碳)，并知道怎样用石灰来检验它。卡文迪许（1731—1810）知道怎样从大理石和酸来制备二氧化碳，他还是制得“易燃空气”(氢）的第一个人。普利斯特列用“富燃素亚硝气”(一氧化二氮，$N_2O$）做实验。在1773年以前，舍勒就成功地制取了“火气”(氧)，他还断言，空气和人们通常对它的认识不一样，它不是一种简单物质，而是氧和氮这两种气体的混合物。

就在这个时期，拉瓦锡用硫磺和磷进行实验（1772)，他注意到有“很大数量的空气被固定了”。但是，这个气体的性质究竟是什么，他没有研究，因为在很大程度上，他是重复布拉克和普利斯特列作过的实验。

## 氧的性质

关键的时刻，也就是氧的发现，在1774—1778年到来了。拉瓦锡开始用红色氧化汞进行实验，这种氧化汞当热度在赤热以下时就分解。它很容易制备，可以从黑色金刚石(碳酸盐)中得到，在空气中加热汞也可以形成。1774年 2 月，巴扬注意到加热红色氧化汞时生成了汞和另一种气体，他把这种气体错认为是“固定空气”(二氧化碳)。同年 8 月，普利斯特列重复了这个实验，把这种气体看作是他已经知道的“减弱的亚硝气”(氧化二氮)。两个月以后，普利斯特列把这个实验告诉了拉瓦锡，拉瓦锡重复了这个实验，他和普利斯特列一样，把这种气体错误地当作“亚硝气”。1775年他向法兰西科学院宣读的《复活节报告》中甚至也是这样写的。拉瓦锡在实验中仔细地核实原初物质和反应后产物的重

量，这是很有意义的一项工作。拉瓦锡的作法是走向新的定量化学的第一步，定量化学就是后来的“质量守恒定律”的实践依据。

普利斯特列看到拉瓦锡的论文以后，急忙纠正这个错误(1775年11月)。因为这时候普利斯特列加热氧化汞得到了氧气（1775年3月)，并且已经发现这个产物并不是他原来认为的“脱燃素亚硝气”。现在，他认为这种气体是空气的一种，“如果说这种气体不比普通空气更好的话，也和普通空气一样”。当时他也十分奇怪，为什么能够得到含燃素比普通空气还少的气体。普利斯特列深受燃素理论的束缚，一直到死（1804）都没有解放出来，那时候，他成了燃素说的唯一信徒。

拉瓦锡就不一样了，他看到普利斯特列的批评以后，立即重复实验，他从金属态的汞制备氧化汞，再一次仔细地核实反应前后的重量，发现这种氧化物就是金属灰渣，和其他金属的氧化物一样。进一步的实验使他认识到，在煅烧时与金属化合的元素是“助呼吸气体”(氧)。1775年5月，拉瓦锡向法兰西科学院宣读了论述动物呼吸的文章，清楚地说明了他对于氧的看法。在此以前，一般认为空气是单一物质，拉瓦锡已经弄清空气是氧和另外一种气体的混合物；后者并不助燃，有些人称它为“臭气”，拉瓦锡称它为“氮”(氮气)。1778年，出版了《复活节报告》的修订版，纠正了他以前称氧为“亚硝气”的错误。

## 水的组成

1782年和1783年间，把水看作是一种元素的陈旧理论过时了。人们发现水是由八份重量的氧气和一份重量的氢气组成的。按照上述比例混合氢与氧，通电火花使混合物爆炸，就形成了水。水蒸汽在高温时又可以和某些金属发生反应，产生氢气和该金属的灰渣。十分清楚，水是氢和氧的一种化合物。

瓦特、普利斯特列、卡文迪许和拉瓦锡是发现这个事实的第

一批人，但是他们的解释并不一样。拉瓦锡这时候已经知道舍勒独立发现了“火空气”(氧)(1773年完成，直到1775年才公布!)，他通过实验证明氢在空气中燃烧形成水的看法是正确的。卡文迪许的实验被证实了。至此，拉瓦锡出版了《关于燃素的意见》(1783年)，指出燃素概念是多余的、自相矛盾的。普利斯特列却千方百计使燃素理论去适应新的事实，他修正了先前的燃素理论，还出版了《燃素说的确立和水组成说的否定》(1800年)。但终究还是拉瓦锡取得了胜利。布拉克声明他信服拉瓦锡的学说，并且要在爱丁堡大学讲授这种观点。1782年路易-伯尔纳德和德·莫尔瓦提出了一套经验的命名术语，拉瓦锡加以修改，在他1789年出版的《化学纲要》中发表。此后，化学化合物不再使用幻想的名称，改用表示它们组成成分的术语了；但在药物学家使用的术语中还保留着幻想的名称。因此，燃烧硫磺得到的气体名为“二氧化硫”，“尖刻的油”改称“硫酸”，从硫酸生成的盐类称为“硫酸盐”。各种金属与氧化合的产物称为“氧化物”，氧化物和水形成“碱”。这种良好而系统的命名方法体现了化学事实，从而使燃素说的失败成为不可避免的。拉瓦锡编出了有三十一种元素的元素表，当时许多人为之瞠目，但是不久这个元素表就被后人扩展了。拉瓦锡还把“光”和“热”看作元素，列入表中，这也很快就被否定了。后来发现他的元素表中有八种元素是化合物。戴维爵士在1809年证明，使电流通过某些碱类能够分离出钠、钾、钡、锶、钙。盖-吕萨克在1809年制备出硼和硅，维勒在1827年制得了铝。

舍勒于1774年制得了氯，1810年戴维认识到氯是一种元素。1811年库图瓦制出了碘，1826年巴拉德制出了溴。

## 原子和分子

现在要解答“什么是化学化合物?”这个问题了。化合物是简单物质（元素）的混合吗？还是化合起来的呢？在新的分子中，

元素是不是保持原来的性质呢？原子按照一定的比例化合，还是对等化合？回答这些问题就形成了现代原子-分子理论。

早在1789年，黑金斯发表了《燃素与反燃素理论的比较》，他的这部著作支持拉瓦锡的观点。他认为，化学化合物的分子是由构成该化合物元素的分子化合而成的。他还推测这些原子只能按一定的比例化合。道尔顿研究了许多混合气体的物理性质和这些气体溶解在液体中的情况，同样也得出了一个建立在哲学原子论基础上的理论。道尔顿在1803—1805年宣读了一篇论文，这篇论文的结论后来阐发成为1810年向皇家学院宣读的一系列演讲。他的主要著作是1808年出版的《化学哲学新体系》，对于原子理论的发展来说，最重要的是该书第一卷的第一部分。虽然他认为相同体积的不同气体所包含的“微粒”的数量是不同的（因为它们的大小不同），但是他所注意的中心是这些最终微粒的重量关系，并且说，化学化合的基础是原子与原子的联系，而不是从物理上把某种微粒分解为另一种微粒。

道尔顿把重量当作原子论的基石，他把“气体以及其他物体的最终微粒的相对重量表”（就是现在所说的原子量）作为他1803年论文的附录。他大胆地假定了原子按简单整数比化合的法则，并把这个法则称为“最简单原理”。他还提出了一个简单的符号系统，用以表示不同原子和原子的化合物。虽然这个符号系统现在已经被更为合用的符号系统所取代，但在当时确实是简化问题的手段。

其他的化学家也讨论了这些问题，他们之间展开了激烈的争论。贝尔托莱在《关于亲合力定律的研究》（1798年）一文中说明，化学试剂比例的不同会改变化学反应作用的方向。但是，贝尔托莱分不清均匀的混合物和化合物，比如他说，煅烧铜的时候依次产生的是颜色不同和比份重量不同的氧化铜。普劳斯特强烈地反对这种说法，他认为，贝尔托莱所说的氧化铜系列不过是组成固定的两种氧化铜的混合物。他根本否认合金、汞齐和玻璃是化

学化合物，在他看来化合物是服从“一种平衡的趋势，这种平衡趋势是自然的意志，甚至决定着实验室中化合物的比例”。

道尔顿提出原子论的时候，有更多的化学家参加了争论，分析数据也积累起来了。这些数据表明流行的分析方法相当不准确，也证实了普劳斯特的看法。德国化学家李希特发表了一系列的论文（1792—1802）论述酸和碱的化合（中和）。他提出了“定比定律”，这个定律可以表述如下：任何两种物质和任何一种第三种物质化合的时候，其具有相等化合能力的相应重量的比例是不变的。这种看法证实了道尔顿的原子假说。

瑞典化学家伯齐利乌斯已经清楚地看到，原子在相互化合时的相对重量，也就是原子量，是化学科学的基本单位。他可能是那个时代最精细的一位化学家。他在致道尔顿的信中写道：“倍比理论是原子论的秘密，但就我所能做的判断来说，迄今为止的全部结果都有助于证实原子假说的正确”。（1813）伯齐利乌斯推动了两项重要的进展。首先，他使用元素名称的第一个字母代替道尔顿的圆圈符号，提出了新的化学符号系统（1813—1814）。其次，他毕生用许多时间测定了大约2,000种元素和化合物的“化合重量”或“原子价”，把这些结果在1818年公开发表。

## 阻碍与接受

盖-吕萨克在1809年发现了不同气体在相互化合时，彼此的体积成整数比、一般是简单整数比；化合产物如果是气体，它的体积也和参加反应气体的体积成简单整数比。这就是气体化合的体积定律。当时，许多人不承认盖-吕萨克提到的体积比份，因为道尔顿强调的是重量比份，这就引起了混乱。道尔顿说，盖-吕萨克的结论意味着不同气体的相同体积一定包含相同数目（或简单关系）的原子。但是，从他的研究结果来看，这是不正确的。

1811年，意大利物理学家阿弗加德罗想要使原子论和盖-吕

萨克的化合体积定律一致起来。通过讨论，他认真地给原子、分子和分子的组分这些微粒下了定义，指出，如果假定气体元素中的微粒不是单个原子，而是这些元素的分子，每个分子是特定原子的小团粒，那么，两种理论的分歧就弄清楚了。物理学意义上的“最小微粒”（元素的分子）和化学意义上的“最小微粒”（元素的原子）是有区别的。但是，分子是由多分子组成的假设在当时是不能被接受的，因为这种观点似乎和戴维与伯齐利乌斯的化学研究结果相矛盾。

电解现象，也就是把两个电极放入某种物质或者这种物质的溶液中，就可以使化合物分解，在每个电极板上形成分解产物（如电解水得到氢和氧），这两种产物带有等量电荷。这个事实，在许多人看来，合乎逻辑地证明了化学亲合力和化合作用的产生就是由于存在带正电荷和带负电荷的物体的缘故。伯齐利乌斯就是在这个基础上提出了他的二元理论，许多化学家接受了这个理论。伯齐利乌斯不接受阿弗加德罗的观点，他拘泥于化合重量的概念，这就使他只能由几种从理论推导出的可能性中提出某一原子量。

1819年，裴替特和杜隆发表了一篇论文，事情就变得更加复杂了。他们把原子理论和热的理论联系起来，指出，一个元素的原子量和它的比热的乘积是6.0。在一般情况下，这个经验公式可以帮助人们从伯齐利乌斯的准确化合重量得出的数据选择合适的原子量，但有时不能成功。杜马在高温条件下测量不同气体的蒸气密度时（1827）碰到了困难。高温的测量只能研究气态的汞和硫以及室温下研究气体以外的那些物质。杜马从“相同的体积具有相同的微粒数目”这个思想出发，但是他的结果和从别的资料得出的结果相矛盾，因为他和伯齐利乌斯两个人都不承认气体微粒是多原子组成的分子，他们认为气体微粒就是原子。如果杜马把汞蒸气微粒看作是包含两个原子的分子，硫蒸气微粒是包含六个原子的分子，那么他的结果就和其他人的数据一致了。

在1827—1857年间的文献中，原子量和从这些原子量算出的分子式都不相同，而且互相冲突，化合重量也有许多不同的测定结果。原子理论似乎失败了。但是，在1843—1856年间，杰哈尔特和劳伦特证明，已经测知的许多化合物的蒸气密度的数据是有规律的，这种规律性可以用“相同体积—相同数量”推导出的简单关系来说明。物理学家发展起来的分子运动论也证实了这个看法。后来，又发现了其他的一些现象，使人们逐渐抛弃了伯齐利乌斯的二元理论，这时，就可以对于他所采用的原子量数据进行修订。以后积累起来的事实证明，在某些情况下。物质在气体状态时，确实存在多原子组成的分子。

由于存在不同的原子量和分子式系统而造成的混乱，终于被意大利化学家康尼查罗澄清了。他在《化学哲学教程纲要》(1858年)中回到阿弗加德罗论文提出的观点。他说，“我们假定，相同体积的气态元素和气态化合物，它们所包含的微粒数目是相同的。不要把这些微粒与原子相混同，它们是组合的。在某些情况下是由同类原子组成的。我们不能在相同体积的元素气体中找到相同数目的原子，但是比较这些元素的气态化合物的密度，就可以得出重要的结论。我们发现，每一个元素的不同化合物，都处于气态时，其相同体积中所含元素的重量，都是某一个最小量的简单整数倍。我们应该以这个最小重量去校正目前通用以氢原子量为单位的体系中的所有元素的原子量”。

根据上述理由，康尼查罗证明“斐替特-杜隆值”和“气体密度数据”是一致的，这样一来，一个统一的原子量系统就形成了。不久，大多数化学家接受了这个理论。他们发现，道尔顿想要确定“单纯物质和化合物相对重量”这个愿望现在已成为丰富的分析资料的必然结果，并且得到了正确的解释。原子分子理论终于被证实了。

# 第十四章

# 伊萨克·牛顿

十六世纪中叶发展起来的自然科学主线，到大约十七世纪末就集中在伊萨克·牛顿(1642—1727)这个占统治地位的人物身上了。从古代—中世纪到当时所谓现代科学（现在称为经典科学）的转变是牛顿明确地完成的。从这一发展的回顾中，显示了三条线索。其中每一条都已在前面第十——十二章里作了简要论述，我们可通过它的最杰出人物予以表示：

（a）天文学：哥白尼、第谷·布拉赫、开普勒、伽利略、惠更斯。

（b）力学：斯台文、伽利略、惠更斯。

（c）光学：伽利略、开普勒、笛卡儿、惠更斯。

这一时期研究自然的主要方法可以看作是机械的。这个词意味着：对自然现象的解释，除了以只有相互接触而不受其他影响的粒子的形状、大小、位置、排列和运动的假设为基础以外，其他解释都被认为是不正确的。用这一方式研究自然过程的典型代表是笛卡儿、伽桑狄、波义耳和惠更斯。

牛顿在科学发展上的贡献可概括如下：

（1）他通过奠定力学自身的公理基础把力学确立为一门独立科学；

（2）他阐明了如何把力学应用到自然科学各领域；

（3）他通过使力学与理论天文学相联系确立了地上和天上物理学的明确综合；

（4）他为光学的理论和实践开拓了新的基础；

（5）他对机械论的自然科学概念赋予新的意义；

（6）通过所有这些，他为整个自然科学领域开创了新的前景，直到今天仍在不断地实现这一前景。

所有这些成就都编进了两本书：《自然哲学的数学原理》（1687）以及《光学》（1704）。然而，他的绝大多数决定性发现并不是在那些岁月里做出的。有理由推断，它们主要发生在1665—1667年间，在此期间，牛顿也曾产生有关微积分的基本思想。这些思想对微积分的创立作出了贡献。我们首先要从他的著作中查明他的科学成就是什么，然后再讨论有关它们的演化和其他人可能分享的贡献。

《原理》有三编，并以一章导言做开场白。在这一章中，按欧几里德的方法，力学（运动学意义上的）是建立在定义和公理基础上的逻辑体系。由于这两类基础的巨大的历史重要性，在这里将予以充分的重述。英文原文取自安得里·莫蒂1729年英文版《原理》，该书由弗洛林·卡约里重新校订后，由加利福尼亚大学出版社1934年出版。

## 定义

定义Ⅰ：物质的量由它的密度及体积量度。

这里量也叫做物体或质量。用代数式表示为：$m=vd$（m＝质量，v＝体积，d＝密度）

由于密度是单位体积的质量，这就产生了是不是定义循环的问题。答案是：牛顿并不象现代物理学家那样首先问密度是如何量度的。他试图表达的是他所看到的密度的实质：一个物体的体积内充满物质（不是空虚）的程度。

物体的质量由与它成比例的重量来量度，下文将予讨论的摆

的实验已证实了这一点。

定义Ⅱ：运动量由物质的速度和质量来量度。

代数式为：$I = mv$

这里，运动量（现在叫动量）用 I （冲量）来表示。

他通常把运动量看成运动。因此应当记住在牛顿那里：

物体＝质量

运动＝动量

他给出了表达式：

$$I = \Sigma mv$$

总的讲，他似乎已把v、i和 I 看作矢量。因此，用现代的表示方法可写作：

$$\bar{I} = \Sigma m\bar{v}$$

定义Ⅲ：所谓Vis insita或物质固有的力，是每个物体在静止状态或作直线等速运动时尽量保持其原来状态的一种抵抗能力。

当然，这只是一个形式上的挂名定义。事实上，它是第一定律所阐述的惯性原理的先声。上述 Vis insita 被称为惯性力或惰性力，它与质量成正比。当别的力作用某一物体上，试图改变这一物体的状态时，它才起作用。惯性力对施加在它上面的力起阻力作用，而当它为试图改变一个施力物体状态而发挥作用时，则起推动力的作用。

定义Ⅳ：外加力是一种为了改变一个物体的静止或等速直线运动状态而施于其上的作用。

“这种力只存在于作用的过程之中，当作用过去之后，它就不再留在物体上。因为物体只由它的惯性保持它所得到的每一新的状态。外加力的来源则不同，如它可以来自碰撞、压力、向心力。”

定义Ⅴ：向心力是一种使物体拉向或推向或以任何方式使之趋向于中心点的力。

目前通常称为有心力。应当注意到，通过一个力心所产生的

引力概念一点也没有超过推动、倾向、朝中心的趋势的概念（如同在它后来的发展中那样）。在解释定义Ⅷ时，牛顿强调指出，他将不加区分地使用这三个词，不是从物理上，而是从数学上考虑这些力。因此，每当我偶尔谈到吸引中心或者被赋予吸引能力的中心时，读者不要以为我使用这些字眼，是想为任何一种作用的种类或形式，及其原因或物理根源作什么定义；或者以为我想把真正具有物理意义的力归诸某些中心（它们只是些数学上的点）。”他并没有把力看成物理的现实，而只看成数学描述的工具。

定义Ⅵ—Ⅷ中的每一项都定义了一个向心力的量。

定义Ⅵ：向心力的绝对量正比于把它从中心传到周围空间的原因的效力。

例如：在磁场中，磁极的磁力。

定义Ⅶ：向心力的加速量正比于其在一定时间内所产生的速度。

这是一个在给定点场的强度问题，对重力场而言，它是自由落体的加速度。很明显，定义中已含蓄表明，在一个力的影响下，一个点才获得与时间成正比增加的速度。

定义Ⅷ：向心力的运动量正比于其在一定时间内所产生的运动。

因此如果加速量是a，则运动量为ma。

应当注意的是，在上述三个不同的量中，只有加速量才被用于指力。虽然这里所定义的仅仅是向心力，但所导出的概念也适用于其他力。

定义后面有一项“注释”。在注释[redacted]，牛顿引入了绝对的（或真正的和数学的）和相对的（或表现的和通俗的）时间，绝对和相对的空间，绝对和相对的位置，绝对和相对的运动等概念。

## 公理，或运动定律

定律Ⅰ：每个物体继续保持其静止或沿一直线作匀速运动的

状态，除非有力加于其上迫使它改变这种状态。

这可用下面例子说明：

（i）抛射体若不因受空气阻力而减速，或因重力作用而向下降落，它们将永远保持自身的运动。

（ii）一个旋转着的轮子，只要不受空气阻力它将不停 地转动。

（iii）行星和彗星在空间受阻力小，能较长时间保持它们的前进和回转运动。

这三个例子没有一个是令人信服的。（i）和（iii)肯定不能用经验证实，（ii）中根本谈不上保持匀速直线运动。①

定律Ⅱ：运动的改变和所加的动力成正比，并且发生在施力的直线上。

若施加的力（可以看作一个冲力）是I，这个定律可以看作：

$$I = \triangle(mv)$$

牛顿明显写的是变化而不是变化率。我们不能象许多人主张的那样，认为牛顿第二定律相当于下式：

$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

因为这毫无根据，此式所定义的是持续力的效应，而第I②定律的应用范围明显指的是冲力。

定律Ⅲ：每一个作用总是有一个相等的反作用和它对抗；或者说，两物体彼此间的相互作用永远相等，并且各自指向其对方。

对这一作用与反作用原理的阐明，可能是牛顿对力学发展贡献最独到之处。

---

① （ii）在《原理》第二版中可读到。在莫蒂翻译的第三版中，（ii）所处理的是一个旋转的陀螺。——原注

② 这里似乎应是定律Ⅰ，疑是原文印刷错误。——译者注

显然，公理中所涉及的各运动都被看作绝对运动。

三个运动定律的某些推论如下：

推论Ⅰ：一个物体，同时受到两个力的作用，就将沿平行四边形的对角线运动，所用的时间和它分开受到这两个力作用而沿两边运动的时间相同。

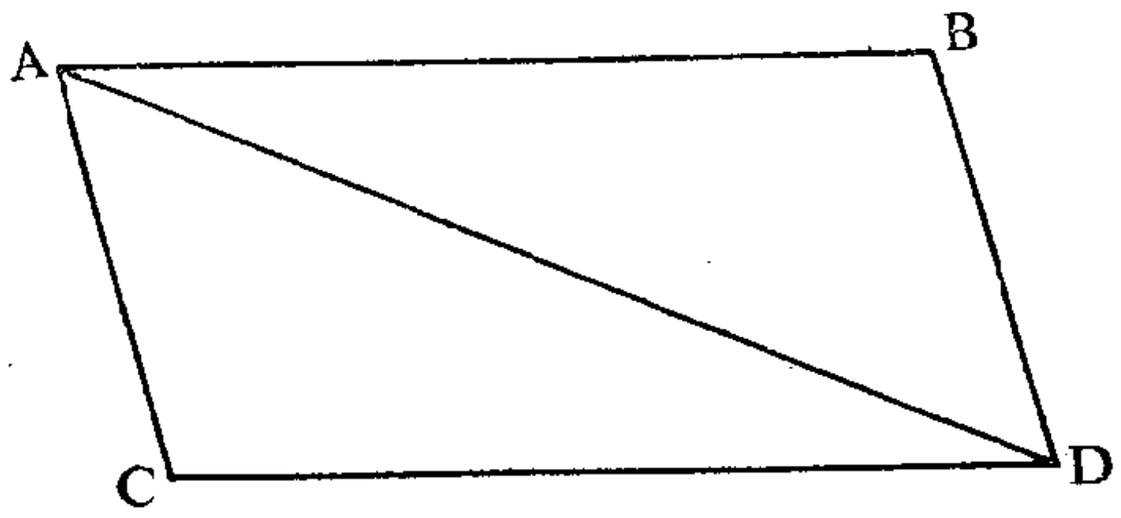



图18：牛顿的冲力平行四边形

假设在图18中，由于A点受到一个冲力M，物体在时间t内匀速经过距离AB；由于A点受到冲力N，它也经过距离AC。

按照定律Ⅱ，每一冲力都不改变另一冲力的作用，因此在时间t内，冲力M把物体带到线BD上；同样，冲力N在相同时间把物体带到CD线上。所以t时刻后，物体必须既在CD上又在BD上，这就是位于D点。根据定律Ⅰ，物体沿着AD匀速运动。

以后最终作为明晰的公理表达的陈述，即一个力的效应与它所作用的物体运动状态无关，从牛顿对第二定律的说明中已表明。他认为在第二公理中已经隐含着：一个物体由一个力的作用而产生的动量改变发生在此力所作用的直线上，所以，它与任何运动无关。牛顿的陈述指出，在第一个力的影响下，物体将匀速从A运动到B，而定律Ⅰ的专门说明主张在两力影响下物体将匀速从A运动到D，这毫无疑问地表明，牛顿所考虑的是冲力。

推论Ⅱ涉及静力学中诸连续力的合成与分解的问题。它包含的推理与上述和下述内容没有逻辑关系。

推论Ⅲ的含义是：一组物体的总动量不因它们彼此作用而改

变。所有速度都假定沿平行线方向，而且必须按它们的方向标出正负。如果速度不沿平行线方向，就要把它们分解成两个方向。

推论Ⅳ表示，一组物体的重心若没有受到它们彼此间作用力以外的力作用，将保持静止或匀速直线运动。

推论Ⅴ包含了经典力学的相对性原理，这已在第12章做了说明（原文211页）。

推论Ⅵ阐述了一组作相互运动的物体，当它们受到相等且平行的加速作用时，它们的相互运动并不改变。

在一条“注释”中，牛顿指出伽利略已经从前两个定律和前两个推论中导出落体定律。这一已长期保留在历史文献中的说法，恰与有关伽利略的各种史实相矛盾。在《原理》第三版中，这个说法后面还附有关于在真空里一个恒定重力产生的运动，其经过的距离与时间的平方成正比的证明；这一推断在最初两版中未出现。

在此项“注释”及其他地方，牛顿在两种完全不同的意义上毫无区别地使用力这个词：“当一个物体下落时，其作用相等的重量的均匀力在相等的时间间隔内对该物体产生相等的力；而在整个时间内一整个的力，作用于物体，产生一个与时间成正比的总速度。按比例倍数描述的距离是速度与时间的乘积，即和时间的平方成比例。”他助长了对“力”的意义十分混乱的使用，这一情况一直延续到十八世纪，也波及到十九世纪。有时，它表示作用在一个物体上的力并对物体产生一个加速度；有时则表示一个运动物体所具有的某种东西，该物体的力时而有些象动量，时而又有些象动能。

在非常精细的摆实验（考虑到一定的空气阻力）中，他证实了汪利斯、雷恩和惠更斯碰撞理论的结论，特别是碰撞不能改变两个物体彼此间相对速度的定理。他导出了非完全弹性物体的恢复系数。

牛顿在这儿对经典力学基础做的阐述比其他任何议题都更详

尽。这可能是违反真实的比例和要遭到反对的。但是要记住，《原理》导论一章是一份重要的历史资料，是每一个愿意了解自然科学进化的人都应该知道的。

当然，对于后三编的内容只得简略地加以论述。

在引入一个数学处理之后（见第15章），牛顿在“命题Ⅰ”中指出：在一个中心力影响下，运动服从面积定律，即从力的中心到运动点的矢径在相同的时间内扫过相等的面积。归根结底，仍把连续中心力设想为周期性的冲力，其周期接近于零；其余仅需运用第一、第二定律。其次，取决于与中心距离的力的作用方式，推导为在一个中心力影响下的不同运动情况。对于一特殊的、力的中心在焦点上的椭圆运动来说（按照开普勒第一定律，这一情况出现在行星绕太阳运动之中），命题Ⅺ指出，这个力与距离的平方成反比。第二定律已独立于力的定律被发现；接着证明第三定律是行星运动力的特殊定律。

应当指出，虽然牛顿从开普勒第一、第二定律推导出：一个朝着太阳方向作用在行星上的力与行星到太阳距离的平方成反比，但开普勒第一定律不能从这一定律反推出来。

第一编其余部分几乎完全是讨论行星运动，而正如上面命题所述及的，所有问题都归结为力学问题并作为力学问题予以解决。如命题61包含了月球运动的完整的扰动理论，但一点也没有提及月亮这个词。从《原理》的由来看，特别应提及的是命题71-74，其要点是：当一个均质球体每一质点对球外一点施加力（这个力与距离的平方成反比）时，其在这一点的合力与假设球的整个质量集中在其中心点时相等。

《原理》第二编“物体（在阻力介质中）的运动”充分说明了论著的标题：它是一篇一般的数学物理学论文，与天文学没有任何直接关系。这编研究的题目是：在阻力与速度相关的各种假设下，阻力介质中的运动；流体静力学和流体动力学问题；振动和波动；流体环流运动。对所有这些题目的论述都具有巨大创造

性，但由于分析论证极端缺乏，并由于不断使用无穷小量，因而现代读者要抓住其意义是困难的。

第三编“世界体系的数学分析”，* 包含了牛顿最为惊人的成就，他根据引力的一般理论把力学应用于宇宙。行星围绕太阳的运动，每个行星的卫星围绕其中心体的运动，地面上的落体、抛射、潮汐运动现象都可以从一个共同的出发点加以考虑：

“凡是物体都具有相互吸引原理”。

“两个物体彼此相吸，引力大小与它们的质量成正比，与它们距离的平方成反比。”（第三编卷首《哲学中的推理法则》法则Ⅲ的注释）

在月球这一特例中，通过查明月球绕地球轨道的加速度、自由落体加速度实际上是否与月地距离及地球半径成反比，从而使上面的表述得到定量证实。关于此项证明最初宣告失败，而在许多年后才获得成功，从而使牛顿大为激动，云云，这种详细的、戏剧性的传说是没有足够根据的。如果除了考虑牛顿的品格（特别是他厌恶宣扬自己的发现），要寻求万有引力定律之所以推迟公布的其他任何解释，那末较为明显的想法是，他在寻求命题Ⅰ，71-74的证明时，似乎要克服许多困难。但并没有任何推迟或延误的明确证据。

命题7包含了导言中提到的、质量和重量成正比公理的实验证明。这是通过比较两个等长摆的振动周期说明的。两个摆体的重量相等而物质组成不同（木头和金子）。在两种情况下，空气阻力相等。没有发现摆动周期的不同。

第三编进一步描述了万有引力论在天体力学中的应用。它们之中有一部分（象月球扰动理论）归入了第一编。其中还有通过三项观测确定彗星的轨道、岁差、潮汐和各行星的共面性的应用

---

* 《原理》第三编不应与《世界体系，著名的伊萨克·牛顿爵士的通俗论证》一书（出版于1728年，系供一般读者之用）相混淆。《原理》第三编编入上述卡约里版本中，大概是牛顿本人所写。——原注

例子。

在牛顿以后，人们紧接着就开始习惯地以相互吸引的说法代替相互间的引力。这几乎不能与他自己的概念相协调。虽然他偶然使用吸引这个词(attraction)，但根据他在《原理》的导言一章中的陈述，他所说的仅仅代表由实验所获知的中性词引力（gravitation)，即月球受地球的引力作用以及行星受太阳的引力作用。如果承认开普勒定律，这就不是一个假定而完全是事实。另一方面，吸引这个词已被认为是一个引起引力作用的明确的物理概念，并没有什么论据说明为什么宁愿要用这个概念而不用推力、倾向、趋向。事实上，似乎人类心理对吸引这个概念有偏爱。从古以来人们都说磁石吸引一块铁，其实所观察到的不过是铁朝着磁石运动。

现在，对著名的《总释》作些考察来结束我们对《原理》的讨论。《总释》出现在书的结尾处，在这里作者稍微离开了他曾一贯坚持的严密科学框架。首先，它概括论证了笛卡儿学派的行星运动的涡旋理论是站不住脚的，这就使我们弄清了他为什么在第二编第Ⅸ节单独研究流体的环流运动。很明显，他整部著作主要目的之一就是对涡旋理论的驳斥。

随后他论证说，太阳系的结构清晰地表明按一定计划安排每件事物的理性上帝的存在。令人注目的事实是：所有的行星都在实际上互相重合的平面内沿同一方向绕太阳运动；彗星轨道的偏心率较大，这使它们容易快速地在行星中间突进，按开普勒第二定律，其速度在太阳附近很快，在远日点很慢，随后它们彼此间距离更要远得多，因而相互吸引也更为减弱。如果恒星也是行星系的中心体，它们也按同一计划安排并受上帝力量的支配，上帝布置这些星球，使它们彼此充分远离，以防因重力作用而互相叠落。

接着，牛顿详细讨论了上帝的特征。我们从经验中知道上帝的某些品格特征（性质），但丝毫不知他的实质（本质）。这一段以富有特色的辞句结束："因此，有关上帝的许多问题，从显现的事

物中对他加以论述，这必然属于自然哲学的范围”。

下面全文引述最后一段话：

“一直到现在，我们已用重力解释了天体现象和海洋现象，但还没有说明重力的来源。此项力必有一原因，使之贯穿太阳及行星中心而不受丝毫损失。它的作用不是依据受重力作用的质点面积大小（如力学所采用的原因），而是依据这些质点所包含的物质的量，它的效力向四面八方传播，直至无限，总是与距离的平方成反比……。

但现在，我还没有能够从现象中发现重力的这些特性的原因，我不构造假说；因为凡不是从现象中推导出来的任何说法都应称之为假说，而这种假说无论是形而上学的或者是物理学的，无论是属于隐蔽性质的或者是力学性质的，在实验哲学中都没有它们的地位。在这种哲学中，特殊的命题总是从现象中推论出来，然后用归纳法得出一般的结论。物体的不可入性、运动性和冲力，以及运动定律和万有引力定律，都是这样发现的。但对我们来说，知道重力确实存在，并且按照我们已说明的那些定律起着作用，还可以广泛地用它来解释天体和海洋的一切运动，就已经足够了。

现在我们不妨再谈一点关于渗透并隐藏在一切粗大物体之中的某种异常微细的灵气，由于这种灵气的力和作用，物体中各微粒距离较近时能互相吸引，彼此接触时能互相凝聚；带电体施其作用于较远的距离，既能吸引也能排斥其周围的微粒；光被发射、反射、折射、弯曲，并能使物体发热；一切感觉被激发，动物四肢遵从意志的命令而运动，也就是由于这种灵气的振动，感觉沿着动物神经的固体纤维，从外部感官共同传递到大脑并从大脑传递到肌肉。但是这些都不是用几句话可以讲清楚的事情；同时我们也不能提供足够的实验可用来准确地决定并论证这种电的和弹性的灵气发生作用的规律。”

这一段有双重意义。它再次证实了牛顿在这部著作导言一章

中的叙述：他不希望把引力理论中的力看作物理实在，而是作为数学描述的工具。可是，它也揭示了在牛顿内心深处喜欢超越他的各项原理的范围，并想借助以太假说从物理上想象和理解自然现象。但他完全同意伽利略在《谈话》中宣布的观点，他把这项工作留待将来完成。

他所采取的严谨态度很少为人了解。虽然他断然否认一个物体可以超越真空对另一个物体施加影响的想法——他认为是荒谬的——但他仍被指责假定了“超距作用”。他的两位伟大的同代人，惠更斯和莱布尼兹谴责引力理论堕入容量和质量的经院观点，宣布了他们自认为是决定性的论点，即引力是非机械的。确实，在十七世纪赋予这个词的意义是非机械的，那时引力仅仅是指质点间的接触效应。出人意料的是：一个多世纪后，牛顿的引力理论被看作是自然界机械论观点的原型，并由此受到赞誉。

当然，这一改变并不使我们惊奇。我们知道“机械论的”即意味“借助于力学”。第一个概念的内容按照第二个概念的发展而变化，因此两种机械论观点并不必然是同一的。

牛顿的出现对科学发展无比重要。大概没有一个人象牛顿那样由于建立万有引力理论而使自然哲学获得根本上的革新。

这种革新的荣誉实际上是不是单单归于他，这个问题的出现并不奇怪。这一点牛顿在世时就已被否认，罗伯特·虎克要求在引力理论以及随后解释行星运动方面的优先权。与过去通常的看法相比，现在某些历史学家对虎克的要求更加重视。他们指出，在过分崇拜的气氛中，英国人一成不变地捧着他们伟大的同胞牛顿，而把虎克扔到后边。他们援引虎克的看来万无一失的声明，证明把天体力学的革新单独归功于牛顿是不公正的。作为例子，我们提出1674年虎克题为《从观察角度证明地球周年运动的尝试》论文的一个片断。其中，他提出了为建立一个宇宙学说所需要的下列命题：

“第一，所有天体（不管是什么样的）都具有一种朝向自身

中心的吸引或引力，从而它们不仅吸引自身各部分，防止它们飞散，正如我们观察到的地球情况那样，而且它们也吸引它们作用范围以内的所有其他天体。

第二，所有物体不管是什么样的只要它们作一个方向的简单运动，都将保持其直线运动状态，直到它们受其他有效的力作用发生偏转或拐弯，成为圆的，椭圆的或其他某些更复杂的曲线运动。

第三，这些吸引力随着物体越来越靠近自身中心的作用而越加强大，但两者关系是几次幂我还未从实验上证明。”

可以想象，这段文字表面读来会产生这样的印象：它本质上表达了十三年后牛顿《原理》讨论的一切。但较为仔细地阅读就会发现，它从头到尾缺乏准确的即定量的要素。

虎克确实认识到，一个具有初速度的物体，受到与此速度成一角度的力的作用，其运动可看作是惯性运动和单独受力作用的运动的合成，但这些揣测距离精确的数学分析很远。说明力大概随距离减小而增加是不够的；要紧的是说明它是如何变化的。虎克说，他还没有从实验上证实这一点，表明他还没有认识到当时需要的是数学推理而不是实验，所有关于行星运动的实验资料已包含在开普勒定律之中。

虎克的悲剧在于他的出色实验才能没有得到数学能力的补充。照他的看法，这些实验能力补偿了数学能力的缺乏，数学分析并不是根本重要的。这一误解保持了很长时间，甚至在我们的时代还没有根除。还有人认为，物理理论的数学公式和数学分析仅仅是一个由数学家提供保证的技巧问题，而一项成就的真正价值只在于丰富的思想和实验检验。

虎克最后必定了解到，力必然要和距离的平方成反比。然而，这是十七世纪七十年代英国学者的共同知识，这种可能性是很容易看到的。他们已可自由运用开普勒第三定律和惠更斯1673年在《摆钟论》中叙述的公式（使一个点描出匀速圆周运动所需的向心力公式）。现在，当一个行星以半径 r 的圆周绕太阳旋转时，

我们可以有根据地得出下列关系：

按开普勒：$\frac{r^3}{T^2}=C$

按惠更斯：$F=\frac{4\pi^2 r}{T^2}$

从两个关系式中消去T，我们得到：

$$F=C\frac{4\pi^2}{r^2}$$

即力和距离的平方成反比。这只能应用于以太阳为中心作匀速圆周运动的行星，而开普勒第一定律指的是一个椭圆，这一简单的演绎不能与之很好地适合，只有牛顿有能力解决这个带普遍性的数学问题。

虽然虎克在建立引力理论上确实有功，但这种功劳不是根本性的。

牛顿在光学领域（他的第二个活动领域）所作的原理性发现也是在1665—1667年间，但没有象数学和力学的发现那样拖延其发表时间。1672年牛顿在致皇家学会的一封信中报告了光学发现，题目是《关于光和颜色的新理论》。从各方面来的批评很使他烦恼。惠更斯对牛顿工作评价很低，这特别使他生气。后来，除非待到发现做出多年以后，他是非常不愿出版并且常常不泄露他的发现，其原因之一肯定就是上述经历。

很长时间以来牛顿在光学领域的发现一直是这门科学分支的基本课题。这些发现的巨大重要性的明确证据就在于此。

这些发现涉及：一束狭窄的平行光通过棱镜时产生的色散；建立用特定的折射率值来表征每个分立颜色的方法，此折射率从红到紫递增；验证了分立颜色的光线再次通过第二块棱镜时不再色散；有色光合成白光。这一合成证明白光不仅包含有各种光谱颜色，而且是由它们组成的。

牛顿完全意识到这种表达是一种马虎的方式。他指出，红色

光线等说法是错误的，应叫形成红色的或造成红色的光线。正象存在于时钟或声源与听觉器官之间空气中的声音一样，光线本身并不是带颜色的。但是为了适应外行人看到这类实验所形成的表达方式，他继续采用有颜色光线的说法。

牛顿关于折射总是伴有色散的发现使他洞悉了透镜像色差之谜，这个谜曾困扰了所有的望远镜制造者。然而，做为一个不够精细的观察结果，他相信制造棱镜材料的色散能力（即紫光和红光的折射率差）是与中央光线的折射率成比例的。这使他对用不同类型的玻璃组合来制造消色差的透镜和棱镜的可能性失去了信心。因此，他致力于反射望远镜的制造。这类望远镜的方案设计早已有人提出过，而且有的人甚至进行了试制。这些人包括尼可尔·朱希（1586—1670）、波纳芬杜拉·卡伐略利（1598—1647）、麦山尼、笛卡儿以及后来的詹姆士·格雷戈里。后者1633年的《光学进展》包括了对这种望远镜的描述：一个天体的光线被一个中心打孔的大抛物凹镜反射到一个较小的椭圆凹面镜上，后者在大凹面镜的中心孔中央形成最后的像。它可通过一个目镜观察到。这一系统在消除球面像差和只受轻微的色差影响两方面都是合理的。然而非球面镜的制造有巨大的困难，于是格雷戈里放弃了这一计划。

牛顿对反射镜的要求不高，因此获得很大成功。他用一个普通的凹球面镜作为物镜，并通过一个与物镜主轴线成45°角的平面镜遮断像，把目镜配置在镜筒的侧壁上。1672年这台设备被送至皇家学会，做为文物一直保存在那里。

1704年正式出版了牛顿研究和论述光学的专著——《光学》。这部书包括三编：

Ⅰ、几何光学

Ⅱ、薄膜中的颜色

Ⅲ、衍射　问题

在《光学》一书中，牛顿重复了他在《原理》中首次叙述过

的对假说的原则声明："在实验哲学中不考虑假说"。然而，这一次并没有妨碍他对光学和其他物理现象原因做大量推测，甚至有些被他当作事实提出。因此，在他对后来被称作牛顿环的现象做解释时，他把沿着光线容易透射和容易反射的交互猝发当作由实验建立的事实来处理，接着就利用了这一点。

在"问题"一编中，大量解释性假设是以问话的形式普遍出现的：不要……吧？不是……吗？不可以……吧？不都是……吧？不已经……吗？读起来很不令人满意，因为这使人感到作者不是在论证自己的思想观点，并不象笛卡儿那样始终维护自己的见解。他似乎感到了内疚。在他大胆的、甚至常常是幻想式的假设中，他不断放弃他关于自然科学任务和方法的基本观点，这毫不令人惊讶。

从牛顿对光的本质的看法中可知，他坚持一种微粒—振动的混合理论。有时他指的是飞行的粒子流，有时指的是通过以太的振动传播。后一个概念使他能够讨论他书中提到的许多干涉现象。他似乎极为赞同振动理论，但这一理论不可超越的障碍是他认为这一理论与光的直线传播的事实是不相容的。

他在行星运动的理论中应用了吸引力的假定（未作进一步详细解释），获得了很大成功。这导致他把同样的原理应用于光的反射和折射。他假设当疏介质内的光粒子接近与密介质的交界层时，密介质在垂直于界面的一定间隔处施加一个力，并假定它以一种我们在此不能详细探讨的方法产生了部分反射和折射。正如笛卡儿一样，牛顿也认为介质越密，光速越大。因此，他得出相同的折射定律：

$$n_{1,2}=\frac{\mathrm{Sin}i_1}{\mathrm{Sin}i_2}=\frac{V_2}{V_1}$$

间隔作用力也应用于对衍射现象的解释中：置于一光束下的障碍物锐边把光粒子拉出它们的直线路径。因此，牛顿称此现象为"弯曲"。

# 第十五章

# 数学，科学的侍女

## 古代和中世纪的数学和自然科学

本章中断我们按年代顺序叙述的历史，回顾到此时为止在自然科学的发展中数学所起的作用。这样，读者在以后几章中再看到数学所起的作用时，就有了较好的准备。

在第二章讨论毕达哥拉斯的哲学时我们已经看到，数学与科学之间的关系和科学本身一样悠久。在音乐的音程和数字间的关系以及天体运行的几何学处理中，明显地看到这一点。在柏拉图的哲学中也大量地保持着这种关系。其后，不论在何处涉及毕达哥拉斯-柏拉图的思想，都存在着明显的倾向：认为用数学进行思维的趋势，对自然科学有巨大影响甚至把科学作为一种数学看待。一个明显例子，就是阿基米德的静力学公理化（原文57页）一直被当作力学的条理化的典范，因此，人们最终把静力学当作整个自然科学的典范。

希腊人对数学天文学和物理天文学的区分，以及前者取得的成就大大超过后者这一事实，更加助长了科学的数学化。天文学就是天体几何学。

希腊人一方面把音乐与算术相联系，一方面把天文学与几何学相联系的这种独特概念，在波埃修斯所提四门高级学科的组成的动机中，表达得很明

确。有尺度的事物，可以（1）数量多少和（2）量度大小来区分。前者可以（a）单独地和（b）按它们的相互关系加以对待；后者可以（a）静止地和（b）运动地予以处理。

算术用的是1（a）的方法，音乐用1（b）；几何学用2（a），天文学用2（b）。正是由于他（人们给他起了烦琐哲学之师的绰号，并非不公正），希腊人关于数学在自然科学中的作用的观念，从开始就影响了西方文化，虽然起初由于数学发展的水平不高，其效果还觉察不到。

在中世纪，阿基米德和托勒密倍受尊敬，甚至那些不完全理解他们的人也是如此，这就使得人们把他们的方法看作条理化的典范。我们已看到，在十四世纪，用数学处理自然现象的努力正取得进展。在算术方面，收效甚微；在几何方面，则出现了富有成效的图示法。

## 十七世纪的数学和自然科学

随着自然科学进入繁荣时期，证实数学思维极端重要的言论越来越多。虽然库萨努斯的数学是人类用以揭示最高真理的镜子的形而上学论点，或列奥纳多的力学是数学的天堂的说法，在自然科学史上并不真正重要，但对于十六、十七世纪自然科学的最伟大的代表人物伽利略、开普勒、笛卡儿的大量的实质上一致的言论，却不能置之不顾。

伽利略对于数学在自然科学中的作用的看法，在《分析者》一书中，用他自己的话作了充分的表达：

“哲学写在宇宙这部宏大的书中，它一直展现在我们眼前，任我们观看。可是任何人必须首先学会理解书上的语言，学会阅读排印这本书所用的字母，否则他就不能懂得这部书。它是用数学语言写成的，它的印刷符号是三角形、圆，以及其它几何图形；没有这些图形，人类就连其中一个词也不可能懂得；没有它们，一个人只能在黑暗的迷宫里徘徊。”

这段话完全用几何学表述，并不令人觉得意外：天文学，在伽利略时代取得最大进展的这个科学分支是完全适应几何学的；伽利略本人的主要贡献——落体和投射的理论，由于当时代数发展程度不高，大部分也是用几何术语表达的。只举一个简单例子：当他要把一个物体由静止点O经过两个已知距离$OA_1$和$OA_2$自由下落所需的时间作一下比较时，他说道，这两个时间之比等于一个距离与两个距离的比例中项之比。这是他应用欧几里德《几何原本》第五编中的命题推导出来的，而且，就象欧几里德的任何一个命题一样，也完全是用语言进行推理的。今天，我们用$S_1$和$S_2$表示两个距离，用$t_1$和$t_2$表示两个时间，就可写出：

$$S_1=\frac{1}{2}gt_1^2$$

$$S_2=\frac{1}{2}gt_2^2$$

$$\text{因此}\frac{t_1}{t_2}=\frac{\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2}}=\frac{S_1}{\sqrt{S_1S_2}}$$

并且可由这些公式读出伽利略的命题。但在十七世纪，还不可能用代数式表示物理量之间的关系。因此以上的推导虽然在我们看来是显而易见的，可是在伽利略时代，却是不可理解的。

关于数学和自然科学之间的本质关系，开普勒说得比伽利略还要清楚。他采用了柏拉图《蒂迈欧》篇中的基本思想，并进一步提出了他的宇宙论的基本命题：在创造世界的过程中，上帝针对某种世界构成关系，让自己受到数学方面考虑的指导。同时，上帝又创造了能洞察数量关系的人类的心灵，而这种能力，实际上是人类心灵的特有功能。正是开普勒说道，正如眼睛适合看颜色，耳朵适合听声音一样，人类的智力适合认识数量。

人类的心灵是上帝的非物质形象，而大自然则是上帝的物质形象。人演习数学时，就回想已经在自然界中物化的上帝的思想。这就构成了人研究自然科学的能力。正如柏拉图一样，在开普勒看来，也存在着一个比经验世界，比它的物质表现具有更高

实在的理念世界。同样，在他看来，经验论在考察自然方面应实现的功能，在于诱导我们获得由于我们心灵的神圣起源而已经具备的知识。

关于数学和自然科学的关系，笛卡儿不如开普勒那样入迷，但是他深信存在这种关系。在《工程指导规则》(1629年著）一书中，他发展了一种研究科学的理论，其观点概括起来就是：数学的概念与证明，能够而且必须应用于一切世俗科学。其要点是，要永远遵循次序和测量两大原则。次序指在一系列演绎过程中各项命题的排列顺序，测量表示数量处理。

笛卡儿这种极端数学化思想状态不象伽利略和开普勒那样，因对经验的绝对尊重的态度而得以补偿。结果，笛卡儿常常被引入歧途；另一方面，他也未能出自其思想的数学倾向而提出令人满意的自然概念。尽管如此，他对于用数学处理自然科学的趋势同样起了巨大的推动作用。如上所述，他所播下的种子已结出了丰硕的果实，尤其表现在惠更斯的研究工作中。

这三位伟大人物的思想对于十七世纪自然科学的发展产生巨大的影响，在后人回顾时，他们的这种影响比他们同时代人认识得更加清楚。经验研究和数学系统化之间协调一致的结果所取得的巨大进步，在假说—演绎法中体现得很明显。假说—演绎法这个术语不是在十七世纪，而是在较为近的时期才出现的。分析—综合法也不是偶然的，在伽利略以后，就不断地听说过。通用的术语是实验方法或实验哲学，它们都只片面强调了两个不可分割的组成部分中的一个部分。

这极可能是培根在整个十七世纪对于自然科学的哲学不断产生的巨大影响的表现。到十九世纪，这种影响又出现了，科学方法被叙述为经验—归纳法，这很不恰当，但被人们普遍接受了。这个术语不仅低估了(由于抑制)数学在用公式表示假设及演绎结果方面对于自然科学的功绩，而且也无视构造成功的假说所取得的创造性成就。培根关于列出一些表格就会自动导致创立新观点

的基本思想，在研究自然科学应采取的步骤方面，显然仍在迷惑着人们的头脑。

数学对于自然科学的根本重要性自然使我们预计十七世纪数学所取得的进步对科学的发展产生有利影响；同时，又会出现这种影响在哪些方面、以何种方式发生作用的问题。这种预料并没有落空，但是关于这种影响在哪些方面和以何种方式发生作用的问题，要回答得令人信服，并非易事。人们记得的这一时期数学三个最巨大的成就是符号代数学、解析几何和微积分。解析几何是符号代数学的成果，又是微积分的不可缺少的因素。这三者无疑都是重要的，但那时不象现在看来那样明显。

就解析几何和微积分的情况而言，符号代数几乎只是间接被应用。那时还没有把代数用于更简明地阐释科学观点，直到十九世纪，人们才应用了代数的现在认为最重要的功能：列公式，在公式中，按标准单位表示物理量的一些字母与物理量的适当的惯用量纲相配合，并且可以进行计算。

现在流行的一种见解，即认为后来称为微积分而应用于自然科学的数学新分支是牛顿和莱布尼兹所首创，与事实不符。这种说法，把事实缩减得面目全非，它迷人地简洁，却失去了真实性。

不能把微积分的发明看成是孤立的历史事实。积分学中的问题（确定曲线长度、曲线围成的面积、平面或曲面围成的体积、几何图形或几何体的重心），从古希腊起就出现了，在许多情况下甚至已经解决。后来导致产生微分学的问题，在十七世纪初期就已提出，大部分问题已得到解答。牛顿和莱布尼兹的伟大功绩在于指出了积分学问题是微分学问题的逆运算，从而在以前一直是独立发展的这两个数学领域之间建立了联系；他们的功绩还在于引入了微分、积分运算的通用符号和方法。只是从那时以后，微积分这一术语才正式使用。但这并不是说，在那以前没有处理微积分问题的数学分支。

这些分支无疑是存在的。希腊人已经创始了后来在积分学里称为不可分量的概念：把物体看作它的用平行平面截出的横截面的总和；把平面图形看作没有厚度的平行线段的总和；把直线看作不占有空间的点的总和。点、线段和平面是直线、平面图形、物体的不可分的构成基石。这种表述虽然在逻辑上站不住脚，却没有妨碍阿基米德用它取得重要成果，但他在发表的书中，却竭力避免显示他运用了这种表述。在获得结果后，他又运用欧多克斯为无限过程而引入的绝对严格的方法对它们加以证明，这种方法通过双重归谬法达到的精确程度，丝毫不亚于十九世纪的极限理论。

在十七世纪，除了不可分量的概念又增加了无限小量概念。曲线围成的平面图形不再只看作平行线段的和，而且也看作无数无限狭小的矩形的和。这个概念，和具有给定元数的连续统是由比它少一元的不可分量组成的概念一样，在逻辑上也站不住脚，但原因不同。不可分量（点，线段，平截面）的确存在，可是，比它们多一元的连续统如何能由它们构成，令人不可理解。无穷小量并不存在：一条线段的长度可能是零或有限量，却不会是介乎二者之间的什么数。

无穷小量的应用对于十七世纪数学和自然科学发展的重要程度，不亚于不可分量的应用。特别是力学从中得益非浅。正如数学中考察了并非是线段的无限狭小的矩形一样，力学中也考察了并非是点的无限小的距离，以及并非是一瞬间的无限短的时间。力学的研究者们不必再等待微积分学的出现，代数学和几何学已经处理的许多问题现在看来正是微积分的问题。

实际上，微积分本身最初就是比通常更为广泛意义上的被称之为“微元法”的方法的应用。

在莱布尼兹看来，微商实际上就是两个称为微分的无穷小量的商，而积分就是无数个这类无穷小的微分的和。

## 无穷小量的应用一例

现在我们举一个用无穷小量进行计算的实例，选用的是牛顿在《原理》第一编中的基本命题Ⅺ所用的证明方法。该命题是：画出开普勒椭圆的点受到与它和力的中心点的距离平方成反比的力的作用。这一证明是以未经推导就在此提出的关于中心运动的一般公理（命题Ⅵ）为基础的。

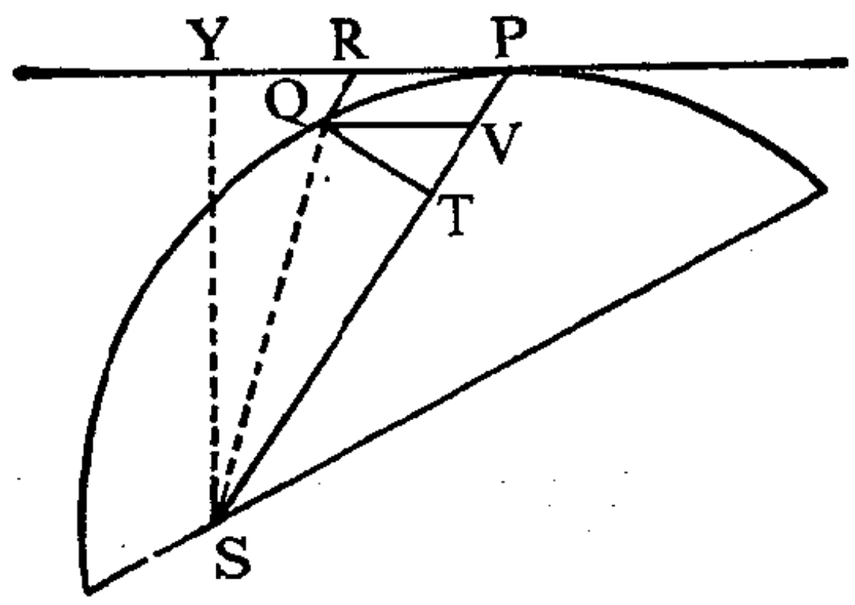



图19，牛顿《原理》第一编，命题Ⅵ。

设点P（图19）在向着中心S的力作用下划出一曲线。在无限短的时间内，它画出了距离PQ。PR与曲线相切于P，QR∥SP，QV∥RP，QT⊥SP，根据命题，力为：

$$\frac{QR}{QT^2 \cdot PS^2}$$

命题Ⅺ的证明如下（图20）：AB＝2a为所画椭圆的长轴，

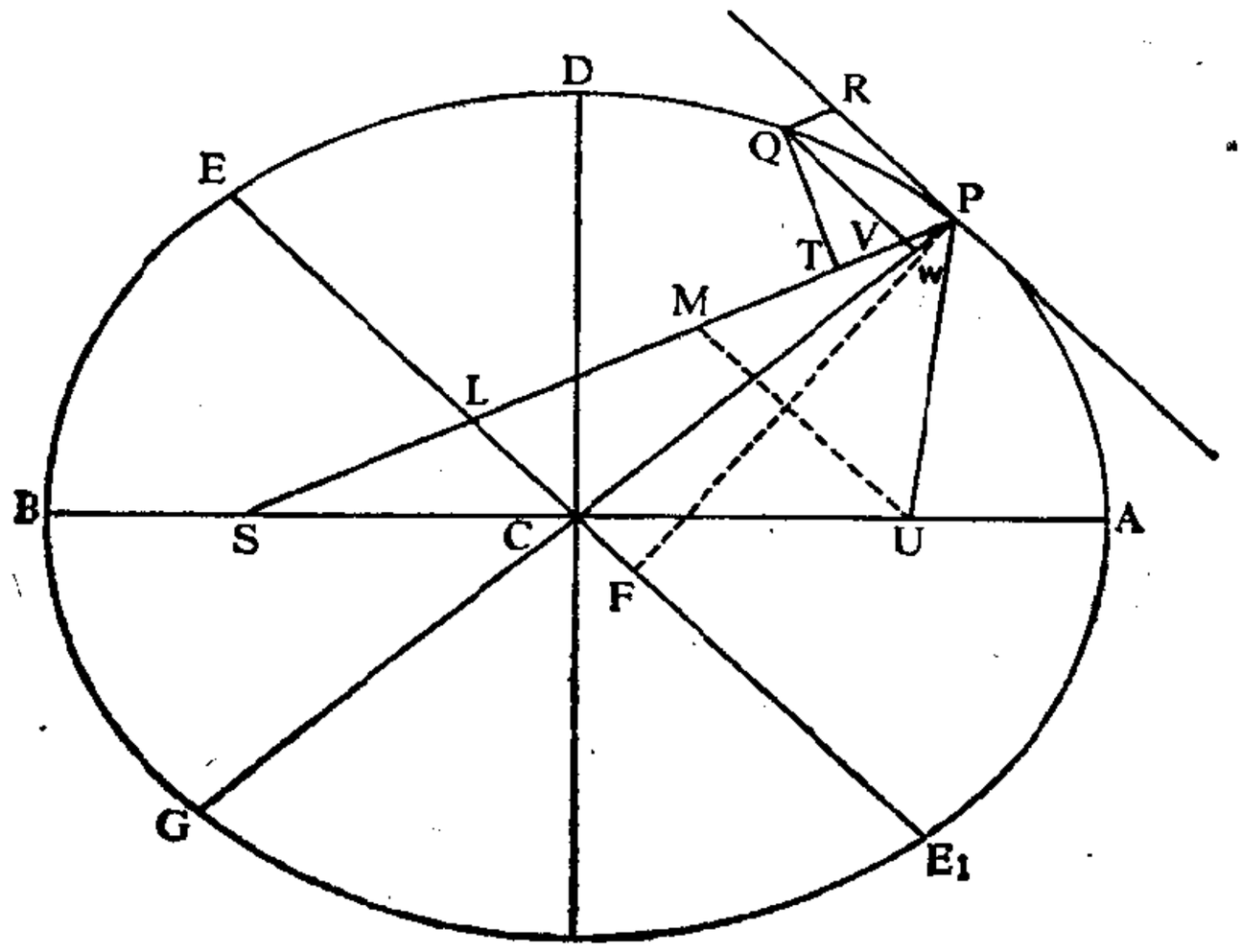



图20，牛顿《原理》第一编，命题XI。

CD=b为短轴的一半。S和U为焦点，S同时为力的中心点。其轭直经GP(=$2b_1$)和$EE_1$(=$2a_1$) 经过中心C。$EE_1$交SP于L。字母P,Q,R,V,T与图20中所标意义相同。延长QV，交CP于W。PF⊥CE， UM∥CL。 CP为锐角∠SPU的平分线,UM平行于钝角平分线PR,PM=PU,CS=CU， LM=LS。所以：

$$PL=\frac{1}{2}(PU+PS)=a$$

这段说明之后是正式的证明。根据古典圆锥截面理论中椭圆的基本性质：

$$\frac{QW^2}{PW\cdot GW}=\frac{a_1^2}{b_1^2} \qquad (1)$$

由于△QTV和△PFL为相似三角形，并根据阿波罗尼乌斯的一个命题：

$$a_1\cdot PF=a\cdot b$$

$$\frac{QT^2}{QV^2}=\frac{a^2b^2}{a_1^2a^2}=\frac{b^2}{a_1^2} \qquad (2)$$

又，由于CL∥VW：

$$\frac{PW}{QR}=\frac{PW}{PV}=\frac{PC}{PL}=\frac{b_1}{a} \qquad (3)$$

取QW=QV，GW=GP，由（1），(2）和（3）可得出

$$\frac{QT^2}{2b_1\cdot QR}=\frac{b_1^2}{b_1^2}$$

因此 $$\frac{QT^2}{QR}=\frac{2b_1^2}{a}=O$$ （椭圆的侧肋高或正焦弦）

根据命题Ⅵ，力为

$$\frac{QR}{QT^2 \cdot PS^2} = \frac{1}{O \cdot PS^2}$$

因此与矢径的平方成反比。

这里所以详细引述《原理》中最基本的一个命题的证明，不只为了说明无穷小量的应用，而且还为了提出一个有关整部著作的一般性问题。

牛顿的论证在现代读者看来，似乎既陌生又别扭。这使人们产生了这样的推测：牛顿是以和他后来发表时所用的完全不同的方法得出结果的。人们猜测他应用了他的新流数理论，却又用传统的欧几里德方式进行推理，以免使得当时还不熟悉他的新方法的读者们不能理解他的推导。

不过，这种见解很难与事实相符。首先，以上概述的推导不是采用欧几里德的方法。它与希腊数学的框架完全不一致，因为这种方法很不精确，所以它毫无疑问排除在希腊数学之外。整部著作所用的基本方法，对和牛顿同时代的大多数人来说，一定也是完全新颖的。此外，也没有任何人曾尝试运用当时已知的流数理论的概念和命题证明命题Ⅺ。鉴于当时微积分所达到的水平的确很难看出是如何进行这一证明的。再者，牛顿确实提出了他的新的流数计算的课题，并确实在《原理》第二编命题Ⅶ的推导中运用了。那么为什么在别处他又故意避而不用呢？

对于数学和自然科学的关系，牛顿的看法与我们不完全相同。例如，人们常常想当然地认为，流数概念的起因之一，是出于给变速运动的瞬时速度概念下一个精确定义这一愿望 。

这种看法对现代数学家是显而易见的，因为他就是以“用瞬时速度去理解什么？”这个问题，向初学者解释微商概念的。在牛顿那里就绝非如此——相反，他把流数概念建立在瞬时速度概念的基础之上，而把瞬时速度当作凭直观就能清楚理解的概念。被看作时间函数的流的流数是瞬时速度的变化率，而不是相反。

在这一章的末尾我们还要说一下，由于微元法越来越多地应用于十七世纪的力学，这就削弱了希腊数学一贯固有的精确性要求。伽利略在《谈话》一书中，严格遵循了欧几里德的方法。托里拆利虽然开始也仿效他这样做，但不久就开始应用起不可分量和无穷小量来了。开普勒则从开始就抛弃了希腊人的严密性。惠更斯自由地运用由微元法提供的巨大的方法上的可能性，但在他出版的书籍中，他还是觉得必须遵循希腊方式。因此，他推导出著名的摆线降落运动的等时性命题所用的方法，与他在《摆钟论》一书中证明这个命题所用的方法，就有着明显区别。但是，要保持这种区别渐渐变得极端困难了，最后他就抛弃了它。有迹象表明，他这样做也不是没有内心斗争的。

牛顿似乎也面临过同样的困境。《原理》第一编是以数学的章节开篇的，题目是“数量的首尾比率法”，这一章里包括许多命题，它们共同构成极限理论。他提出许多与十九世纪的数学中十分相近的公式。但是，一开始著作的正题——力学的发展，就看不见引言一章的痕迹了。

放弃旧有的严格性的要求，无疑地在相当程度上为数学和数学物理学提供了更为广阔的前景，并大大促进了它们的发展。然而在十九世纪初期，当数学家们又恢复了早期的精确性概念，并且要求得更加严格的时候，力学的研究者们在这方面没有仿效他们。结果，他们仍按与数学观点的要求相差很远的方式使用无穷小量。

# 第十六章

# 技术知识出现于出版物

中世纪技艺与工业革命早期阶段之间的过渡时期是由下列诸因素决定的：资本主义的兴起，新的技术手册，舶来的新食物和原料，以及科学界和商界对于技术和工程的兴趣不断增长。

## 对技艺的资助和描述

中世纪的手艺和技巧因行会保守的地方性政策而趋于停滞，但幸运的是，由于国际贸易的发展和对研制新发明的资金的需求，阻止了这种趋向。工业制品的国际交易逐渐粉碎了行会的自给自足倾向，银行家们也逐步应邀对工匠所需的机器提供资助。只有他们才能为矿山、冶炼场和工场的发展提供所需的资金，正是他们热衷于迅速发展海外贸易，而这种贸易是以后五个世纪欧洲经济的支柱。美第奇资助了佛罗伦萨的纺织工业，弗格斯和惠梭斯资助了中欧的采矿和冶金工业；不仅如此，他们还对这些产品在欧洲和海外的分散和销售抱极大兴趣，他们的代理人遍及欧洲大陆，而且还伸展到海外。有的国家对某些奢侈品贸易给以支持，例如法国的哥白林挂毯和瓷器工业，虽然这些“制造业”有重大发展，但很难维持正常的贸易条件。

印刷术不仅促进了技术情报的交流，而且使优秀的发明家和工匠能利用这种新手段为某些操作和

过程提出新的设计和发明。在这方面，我们必须注意下列一些手册：雅克·柏森的“工具演示”(1582)，罗曼利的“各种工程机械”(1588)，弗斯托·范伦邱的“新型机器”(1595)，勃兰加的“机器”(1629)，楚恩加的“新机器演示”(1607)，以及其他许多手册。许多描绘于这些美观图片中的机器仅存在于作者们的想象之中。另一方面，作者们经常借助于古典传统使之得以延续，又努力把这种新机器建立在达·芬奇、斯台文、伽利略等人创立的新力学科学基础上。这给我们深刻的印象。实际上斯台文本人就是应用力学的创始人之一；在他关于风车的论文中(1589)，企图运用力学规律计算磨的输出。虽然科学已经确定地成为测量、计重和计算的艺术而不是一种逻辑体系，但是大多仍然涉及那些对工程师没有很大用处的基本原理。科学发明了几种仪器和工具，例如工程师们开始运用的新数学，但在十八世纪中叶以前，科学的发展还不曾有效地帮助工艺师和工程师们的奋斗。

## 受工程师激励的科学

另一方面，科学确实受到技术成就的激励，例如十六和十七世纪的工程师制成许多类型的泵以排除矿井内的水和提水。罗曼利描述过100多种泵，其中大多数都是用木材制成的，因为当时尚不能铸造精确的大型金属汽缸。机器零件仍采用手工制作，许多标准件如螺丝、螺栓、齿轮等已成批生产，但进步缓慢。但是由这些水泵获得的经验对于托里拆利、波义耳等人的“空气弹性”的研究产生巨大的影响，并推动了为科学家设计的空气泵和真空泵的出现。

我们甚至可以更进一步地指出，新的有学识的社会不仅对于技术有浓厚的兴趣，而且有时确实组织了技艺改进的工作。除了弗兰西斯·培根已为他所构想的研究中心“梭罗门宫”提出这类研究外，皇家学会在其章程中也指出要研究“数学的、哲学的（科学的）和力学的一切东西”，并促进“所有有用的艺术、制造、力

学实践、引擎和发明”的改进。实际上皇家学会已着手编写“手工艺史”,但终未完成。法国科学院也经常着手解决由路易十四及他的继承者们所提出的实际问题。因此，十七世纪被称为“设想的年代”，其中许多只是纸上谈兵，因为不论是科学还是技术都未发展到足以为这些设想提供适当的基础。这些愿望在下一世纪部分地物化，那时不仅科学有了长足的进步，而且为数众多的人们对技艺的发展感兴趣。除科学家外，这时大学对于技术过程的研究也表现出更大的兴趣,其中较著名的是苏格兰的一些大学,在那里我们可发现象布拉克这样直接促进了这类工作的人。在有闲阶级和中产阶级中，也有大量的“业余爱好者”或“鉴赏者”,不仅开始进行科学方面的，而且也从事手工艺方面的研究和实验，他们对于许多发明的出现作了很大贡献，其证据是十八世纪的专利大为增加。兴旺的海外贸易（它使欧洲出现大西洋文明）促使兴趣和资本相结合，这又推动了逐步向西转移的手工艺工业化和机械化。但在这个时期最初，大多数的先进技艺仍起源于意大利和中欧，而十八世纪的工业中心则位于英国、法国及低地国家，在某种程度上也扩展到斯堪的那维亚。

## 原动机

文艺复兴时期的工程师仅应用水轮和风车驱动他们的引擎和机械，这两种原动机都因要求更大功率而有所发展。水轮带动冶金匠的锻锤和风箱、矿工的卷扬机、矿石碾碎机或捣碎机以及其他工业机械。因而凸轮、磨盘和磨道在手册中占很大比重。大多数水轮是下击式的，但以后建成愈来愈多的上击式和逆动式水轮，在一些小册子和手册中以很大的篇幅讨论它们的相对优点。这一问题最后由约翰·史密通予以解决，他对一些模型进行了试验，并比较它们在实际使用中的结果，发现上击式水轮的能量输出约为下击式的一倍（1759)。

这样的水轮也用以带动锯磨、谷物磨和安装在各地的拉丝和

纺纱机械。本时期末，这些水轮的尺寸逐步增大，发动机达10—15马力。只有把几个水轮组合在一起，才能形成大的动力中心。例如雷尼库建成著名的玛丽供水系统（1682），它的十四个水轮的功率为100多马力，用以灌溉凡尔赛宫的花园，并对宫殿供水。在一个世纪内，它是功率最大的发动机组合。

风车的大小也经历了类似的发展，但在质的方面则无甚改变。排水风车成为低洼国家开垦洼地和湖底的重要工具。戽斗轮逐步让位于倾斜的阿基米德螺旋。其中一种小型的低草地风车是柯奈主斯·狄斯克斯·缪斯（1589）发明的。与他同时代的乌特吉斯特的柯奈主斯·考内利茨发明了风力驱动的锯磨（1593）和磨碎油籽用的直缘磨（1597）。他们这一代人目睹把风能用于锯木、谷物脱粒、漂洗、油籽碾磨、颜料、烛花、芥末的磨碎以及在尼德兰沿海省份的造纸。

一种特殊类型的柱状风车，主要用于排水，所有工业用风车都是塔式的，只要转动盖帽，就能使风帆对准风向。帆的效率因缪斯于1589年发明的双曲率式帆而得以提高，但原始的木齿轮只能把风轴上50马力的三分之一功率输至驱动机器的轮轴上，因此风车的容量很难超过10—15马力。缺乏功率较大的原动机的状况，限定了当时机械和制造过程的水平。

一些发明家和工匠首领肯定曾经努力设法建造不同的原动机。达·芬奇试图设计一种蒸汽推动的枪支。惠更斯和他的助手丹尼斯·巴宾一起企图利用火药的爆发推动活塞，但是失败了（1673）。勃兰加想利用蒸汽推动涡轮的叶片。

利用蒸汽冷凝造成的真空比较成功地用于推动活塞。以此原理为基础的原始蒸汽机是由华塞特的马阔斯（1663）和巴宾（1687）设计的。它在很大程度上取决于能否有可供使用的刚硬材料和有效的活塞密封环，例如莫莱（1674）所发明的蒸汽机就是这样。托马斯·塞维利运用相同原理制成的1马力的蒸汽机（1698）取得了专利，他称该机为“矿工之友”，因为原来就打算把它用

于矿井排水。用这种蒸汽机成功地从康姆帕顿宫（凯思通）的一个井内抽水。但这种原始的蒸汽机价格昂贵，难以操纵，并且当时矿工们宁愿因袭沿用人工或牲畜驱动的泵。

## 排水系统及运河的修建

因此，低洼地区排水必需的能量，还是由水轮和风车提供的。十五世纪末，所有较高的沼泽和湖泊均已排干，注意力集中于国内那些落潮时不能把水排入海中的地区。这些地方大量应用风力驱动的排水风车，因为古老的踏车和马拉绞车不能完成这类工作。安德列·维林在写作他的“筑堤小册”(1579) 时，曾描述了所有类型的堤、闸和渠道，但未述及风车。另一方面，首次提出大哈兰姆密尔地区排水计划 (1641) 的利华特提议为此目的安装100部风车。十八世纪荷兰磨坊制作者手册对这类风车给以极大的注意，虽然由于使用原始的齿轮传动装置，它们的输出功率仍很低。用筑堤和牢固的建筑物以及精心设计的坝以开垦土地成为荷兰工程师们的专长，他们中的许多人在外国实施了这样的规划。柯奈利乌斯·弗姆敦爵士排除了剑桥北部沼泽地区的水，柯奈利斯·梅尔到意大利向教皇提出卡帕尼亚沼泽地的排水计划，其余一些人则在波兰和俄国从事工作。

意大利的土木工程师们不得不对付本国的一些急流造成的春季洪水。1495年达·芬奇提出控制阿诺河并使该河道可以通航的计划。他设计了专用挖掘机械、挖泥机及运土用的棘爪或吊车，以及保护堤坝用的苇席编织方法。另一位著名的工程师芬先佐·维维阿尼实现了一项稍经改进的计划 (1679) 。实施这些大型规划的工具是在意大利和低地国家设计的。其中之一就是挖泥机。在十七世纪，早期用泥斗或挖泥网（斯台文）的挖泥形式逐步地被铲斗挖泥机（维杜利诺，罗尼，梅尔）所取代。这样的挖泥机经常用踏车或马匹驱动。

在法国，人们的注意力集中于改进和连结国内2,200英里长

的可通航河道，达·芬奇早就向法兰西斯第一皇帝提出用运河连接大西洋和地中海的方案。但明确的方案是由“平等主义者”勃契利尔和卡塞诺瓦两人制订的，他们在1539年的设计直到1603年才动工，并由瑞格姆·杜·包莱伯斯负责竣工于1681年。除了“米杜运河”外，还完成了罗讷河和塞纳河（1600）、卢瓦尔河和塞纳河（1639）及卢瓦尔河和罗讷河（1765）之间的连通工程，因此可在全国实现廉价的水上交通运输。沿河岸修筑了拉纤通道和码头。

许多这样的运河、排水系统和灌溉工程也与军事上的需要密切相关。斯台文提议用快速动作的船闸使护城河保持适当深度，并设想用河水淹没的方法保卫某些城镇。达·芬奇在一封信中提出为米兰公爵效劳，他在信中强调他作为一名土木和军事工程师所精通的技术，几乎没有叙述他的艺术家的特点。实际上，最初被称为“工程师”的一些人就是这时期的挖掘工、测量员和军事工程师。“encignerius”或“inzignerius”一词在中世纪文献中很少以相同的意义出现，到十八世纪，它一般是指土木工程师，但这只是在设立专门的工程学校之后 。

## 海上及陆地交通

内河航运的蓬勃发展是由海上贸易的迅速增长促成的。虽然在船舶建造中没有发生根本性的变革，但大量的专用船只有所改进，以满足海上贸易所遇到的各种区域性要求和条件。十五世纪上半叶，地中海的所有中世纪商用帆船都获得迅速改进。附设一个小型的前桅，并且为了抵消对船舵的压力，在船尾竖立（第三）后桅，这样使船尾一侧较为平衡。这类三桅船“Carrack”或“Kraek”是首批先进的帆船，它们几乎可以利用所有方向的风力，并且不再受背风岸的限制。前帆、后帆及方帆的组合运用成为所有大型帆船及设计美观的横帆快速帆船的典型形式。

我们不打算描述在此四百年间所设计的各种各样船只，但必

须指出船舶建造在工业标准化发展中所起的作用。不仅桅杆、帆装、滑车和其他零件都很快地标准化以便于在遥远的地方检修船只，而且也建造了标准的船只，例如在英国战争中，荷兰人制造这种船只以补充本国的海军，这与第二次世界大战中“自由轮”所采用的那种方式相同。火炮引入海军也是设计易于航行并且操纵灵便的船只的一个强大因素，这类船适用于“舷侧炮齐射”战术，而不大适合古典海军中的古老金属撞角和齐射战术。

我们也听说过关于潜水艇的设计。达·芬奇曾设计几种水下武器，但为避免更“野蛮的战争形式”而不敢公开发表。柯奈利乌斯·德瑞贝尔似乎设计了一种由划手推进的潜艇，他于1598年取得此项专利，并于1620年在泰晤士河上为詹姆士一世作了表演。巴宾也曾试图着手潜艇设计。我们还发现用起重浮桶把船只举过沙洲或浅滩的方法。在十七世纪这种方法的最早形式是紧贴在船上并抽干的圆桶，但阿姆斯特丹的帕克发明了更为有效的方法（1688），它不仅可供船舶越过浅滩，而且还是现代干坞的原型。

较为稳定的政府的建立也有助于道路建筑的复兴。根本的困难在于筹措这项事业所需的足够的资金。法定的或“求援性”劳动已不能有效推行，它至多向当局提供非自愿的不熟练劳动，难于完成改善道路的任务。因此，虽然各种通过税阻碍着自由贸易，但依然照常征收。

希腊人成就的兴趣引起人们对铺路材料的注意。文艺复兴时期的建筑师们如帕拉提渥和塞莫兹讨论过道路修筑问题，托利泰在一篇短论（1585）中先讨论了他对“破坏物”（车轮）和“碍物”（路面）之间相互作用方面的理论，然后描述了大圆石铺路面的适当结构。1622年一位罗姆斯的律师尼古拉斯·伯奇出版了一本论述罗马道路修筑的书，它引起了苏莱大臣的注意。伯奇提出一种筑路计划：“利用矿区穷人（失业者）的劳动可使人民在战时及平时受益非浅”。考梯的最早筑路手册（1715）叙述了用碎砖

石和土筑成的经过夯实的道路，这就是未来道路的原型。

有轮的交通工具不断增多，人们还企图制作较好的车辆。十六世纪起使用四轮大马车，这种车的车身吊挂在四条皮带上，两根轴用轴杆或木料作刚性连接。这类四轮大马车也用于几个大城市中突然兴起的公共车辆服务中。约1665年开始采用C 形回火带钢制成的弹簧，但对于旅行的舒适无甚补益。约1500年起重新设置皇家邮政服务和送信驿站，开始出现供旅行者使用的道路图和手册，但旅行速度仍然很慢；在1800年之前，远距离旅行每天不超过10至15英里。

1599年亨利四世设立“法兰西大路政官”邮政制度，苏里·科尔贝尔和另外一些掌管邮政的官员则试图建立一个工程师机关，以便修建和维护法国道路系统。直到路易十五在1716年创立桥梁和道路修建部队，才找到一些临时解决办法，它最终使法国有了一个由熟练的桥梁建造者和道路工程师所组成的团体。

更为重要的是关于建立桥梁道路学校（1738）的一项法令，因为它为熟练的土木工程师创建了第一所学校。该校创办于1747年，由法国最优秀的工程师和数学家领导。在十八世纪，特鲁达尼·帕洛纳和特莱沙古特为法国提供了合适的公路系统，以后其他各国也相继仿效。

## 采矿和冶金

印刷术的发明使一系列采矿和冶金手册得以问世。我们最初发现的是十六世纪初关于采矿和试金方面的德文短论。以后一名意大利专家凡诺西奥·毕林古邱发表了《烟火术》（1540）一书。接着出现了许多由乔治·鲍尔（以阿格里高拉为笔名）著述的关于采矿、地质学和冶金方面的著作，其中最有名的是他的《论金属》一书（1556）。往后又有拉扎鲁斯·欧克论述试金的《试金手册》（1574），以及罗纳斯的《采矿手册》（1617）。美洲的冶金学由阿隆索·巴伯（1640），瑞典的冶金学由波德·玛森（1520?）

分别予以描述。在雷奥米尔的《论铁变成钢的艺术》(1722)一书发表以前，前三本手册在冶金实践方面一直占据统治地位。而雷奥米尔的著作标志着冶金学进入一个新的时期。在雷奥米尔时代之前，关于冶金过程的描述没有详细资料，熔炼工和冶金专家们一直保守着自己的私人配方和技术秘密。但他破除了这一传统，并且研究和发表了受严格控制的生产铸铁和钢的方法。他在制造时引入取试样的方法，并用小型试棒的机械试验和观察断裂试棒的组织结构来判断产品的优劣。他实际上是金相实验和过程控制的先驱。

早期的手册都强调试金的重要性，其方法是在坩埚和小型熔炉内小规模地重复熔炼过程，从而确定矿石和合金的成份。这不仅向定量化学迈进了一步，而且也是对矿物、矿石和金属进行适当鉴定的尝试。以后，当文艺复兴时代的炼金术士和冶金学家们所已知的“七种金属”外又增添了许多新金属时，这类累积起来的知识产生了丰硕的果实。这些知识导致对纯砷和锑的更好的描述和制备，(由于公认的医疗效能，砷和锑在1600年前后曾相当盛行！）但对于诸如铋、锌、镍和钴等金属当时还不甚明了，它们主要被当作稀罕之物，而且直到十八世纪才按它们自身的性能把它们当作金属。

铁是主要的金属，1500年前每年产量为60,000吨。其中大部分产自德意志帝国和匈牙利，来自例如象弗格斯那样由银行家资助的大厂。随着美洲金银的流入和紧接着的欧洲经济危机，铁价猛涨。但炼铁厂的成本和检修费用增高并非唯一的困难。炼铁业仍是一种大规模使用木炭的冶金术。较为廉价的生产方法的主要障碍在于可供生产木炭的木材数量有限，因为“海煤”仅用于炼铁的初始阶段，它不适于作为高炉燃料。因此德国和英国冶金业的发展因木材资源有限而受阻，而瑞典因拥有丰富的铁矿（法仑）和森林资源而成为非常重要的条形铁和钢的生产国。本时期末之前，斯惠登堡和波尔姆的工作有助于改进瑞典的采矿和冶

炼方法。荷兰人维尼斯在俄国建成第一批高炉后，发现了乌拉尔山区的矿藏，并从1700年起开始采矿。

高炉和其他冶炼炉的容量和效率都有所增加，冶炼过程的连续时间更长，“冶炼日”可持续四十周，只在检修前，需要停工。冶炼过程主要仍靠手工劳动。在最终加工中用水轮操纵锤锻、辊轧和拔丝。炼铁工业的主要产品仍为熟铁，但铸铁紧居次位。许多人设法制定较完善的制钢方法，但缺乏适当的温度控制，所以未取得满意结果，在这方面雷奥米尔为搞清铸铁和钢结构的努力有助于为生产标准质量的钢铺平道路。其余的金属如金、银、铜的冶炼方法变化甚微，但汞齐化和熔融方法的使用得到了推广。

## 化学制剂、玻璃及釉料

化工著作的印刷较冶金学更早。1500年布鲁希伍克出版了他的《蒸馏小册子》，接着于1512年一本大型手册又问世。它的依据是许多“草药书”和药物手册，如肖弗的保健手册（1485）和约翰·冯·古柏的同类著作（1485）、柯纳德·冯·曼金堡的自然手册（1491）以及一些类似著作。其他象波塔（1558）、吉斯纳·考杜斯、弗胥斯、乌尔斯达特和鲁弗的同类著作主要也是论述药物的性质，但它们还述及许多其他化学制品的制备。事实上，蒸馏工（几个世纪以来对于酒精和化学药品制作者的称谓）与药商和药师仍有密切联系，他们在法国革命以前经常是同一行会的成员。在这些实验室和冶金厂中，发展了化学制剂的新制备方法。

工业化学家们开始逐步坚持自己的权利，他们摆脱炼金术士的徒劳的推测，对后者的理论不感兴趣，因为他们需要生产手工艺和技术中使用的化学制剂。他们不得不在困难的环境下工作，因为当时化学还不是今日的精确科学。对相同的化学物质使用不同的名称（“矾油”和“硫油”两者都是硫酸），没有掌握适当

的纯度试验，又缺乏妥善的温度控制，从而阻碍标准质量生产。但他们之中有许多人对于一些偶然的发现探索到底，并试图寻找新发现的技术产品的问题解答和用途。在这方面，格劳柏、塔钦尼乌斯、肯克尔、查拉斯、柏赖特和列麦里等人为十八世纪末的新工业化铺平了道路。

同时，化学工业也得益于资本主义的兴起。某些化学制品的生产不再局限于实验室内，许多真正的工厂开始生产“硝石”（火药所需的硝酸钾，而不是指名称相同的天然苏打！）、明矾和矾（为制备强酸用）、硫酸锌（作为染色和制草的媒染剂）、氯化铵、汞化合物（医疗用）及矿物颜料。制盐方法是把溶液喷到柴堆使其浓缩。第一家这样的盐厂在1568年建于苏尔察（德国）。淀粉大量生产，供亚麻及造纸工业使用。

玻璃制造在此期间大有进步。但受两项因素限制。第一个因素是可供利用的碱有限。地中海的玻璃制造者使用海藻灰，所生产的是钠玻璃，而中欧的玻璃工则通常使用木灰供他们的钾玻璃之需。当帖木儿的军队在1402年摧毁大马士革时，叙利亚和亚历山大里亚不再输出玻璃，在一个时期间内，威尼斯附近的摩拉诺垄断了优质玻璃制品的制造。当兰曼、西瓦哈特等人对玻璃采用钻石切割技术时，波希米亚人的玻璃制品成为剧烈的竞争者。另一个受限制的因素是燃料，因为木料不足且价格昂贵。托马斯·潘塞瓦尔在其1610—1613年的几项专利指明了用煤制造玻璃的方法。这时玻璃借助于提尼塞特“海煤”在燃煤炉内熔化，熔化时加入少量氧化铅。

优质有色玻璃也开始可供使用。1540年起钴玻璃在德国已经普及，利勃维乌斯和格劳伯为铅玻璃和紫色玻璃提供了理想的配方。1612年南利发表了他的第一部《玻璃制造术》专用手册。含有大量石灰的波希米亚“水晶玻璃”出现于约1675年。1633年英国人托马斯·蒂尔曼生产了首批优质“水晶钻”玻璃，它是由托马斯·拉凡斯克罗夫特在他自己的两个玻璃工场内制造的（1674

—1675），以后立即以“新燧石玻璃”而著称。质地良好的玻璃器皿不仅有助于化学家的工作，而且价廉和适用的玻璃灯、小药瓶和瓶子以及宽格玻璃这时都可供使用。

在陶器制作方面，由于发明新的釉料，因而取得最重要的进展。锡釉料约在1300年发现，在所谓饰花陶器制作中起着重要作用。铅和盐釉料使瓷砖有所改进，它们经常用于保护厨房的墙壁，也用于十五和十六世纪开始在中欧流行的火炉中。伯纳德·帕利赛在他1580年的手册中首次企图解释陶器制作的基本原理。

在此期间，化学工业也得益于在美洲和印度发现的并输入欧洲的一些新材料。它们不仅包括诸如奎宁、秘鲁香脂、吐根等新药物，而且还有象巴西木这样的新染料及各种调味品。通常是把原料输入欧洲进行加工。

## 日常生活中的变革

海外发现造成的最重要变化大概是在食品方面。玉蜀黍和马铃薯成为最有价值的新获得物。马铃薯在十六世纪末由南美（秘鲁和玻利维亚）传入西班牙，起初它只是植物园里的珍品。以后出现于富人们的餐桌上，但到十八世纪才确认它作为食品的价值，它在几个欧洲国家的种植是强迫的，因为农民对它的引入仍很不满意。不久它不仅成为有价值的食品，而且也是淀粉和酒精的制作原料。

在发现美洲后不久，玉蜀黍便传入欧洲，几年内就遍及地中海地区。但奇怪的是，它被人们或多或少地遗忘了，而当人们再次注意这种有价值的谷物时，又从小亚细亚以“土耳其玉米”的名称重新引入。十六世纪，在东南欧大规模种植玉蜀黍，用来煮粥喝。

新的饮料茶叶、咖啡和可可的引入促使许多新工业兴起，并且使饮用习惯完全改变。荷兰东印度公司于1609年首次把茶叶运往欧洲，到该世纪末，它已成为西北欧的大众饮料。在意大利、法国和德国，咖啡要普遍得多，它传至这些国家的年代大约

与茶叶的传入时期相同，到1700年咖啡种植园遍布东方，而在南美则开始建立一些新的这类种植园。可可是在1600年前后传入的，但只是在大量供应蔗糖后，它才成为可用饮料。

蔗糖生产是从穆斯林世界学来的，以后移植到西印度群岛，该地长期保持对欧洲供应原糖的垄断。以雪茄或旱烟筒形式吸烟也是在十七世纪传入的，尽管税收很高且各国经常颁布禁令，但这种习惯还是保持下来了。嚼烟和吸鼻烟的习惯使这一时期还出现了一些新的工业。

一些新型机器也被用于磨坊。罗曼利（1588）和柏克勒（1662）提出较为有效的滚筒磨，但这类磨只在所考察的时期结束以后才普遍使用。而筛细加工由于鲍勒（1502）、凡拉邱和罗曼利(1588)等人的努力而达到机械化。由于磨粉生产是分散进行的，并且在许多磨坊普遍使用原始机器，所以阻碍了它的机械化。

在照明和取暖设施方面无甚进步，但发明了较为完善的防火器材，它们在木结构房屋的年代里减少了火灾的危害和发生次数。十七世纪末，双向手动泵能产生连续的喷射流，它大大有助于例如在伦敦大火灾（1666）中的灭火。

在十七世纪，对于公共卫生给予很大的关注。约翰·伊凡郎在他的《论烟雾》(1661)中提出消除燃煤的火炉和工厂的煤烟及臭气的建议，威廉·配第爵士已经提出社会统计科学或“政治算术”，以后格雷特在其《观察》一书（1662）中用这一概念断定“伦敦的烟、蒸气和臭气是如此严重地毒化和污染伦敦附近的空气，以致使伦敦变得更小了。”因此，对于供水方法、适当的污水处理设施和街道清洁等方面采取了较多的措施。

各地方当局设法妥善处理在未铺路面的城市街道上因有轮交通工具增多所形成的泥水。有时完全禁止有轮交通工具通行，只准雪橇或手推车通行。补救的办法是铺设比中世纪的大圆石铺成的更好的路面，这类路面自两侧向中央敞式排水沟倾斜，并有无数横向阴沟穿过。人行道用相隔一定距离竖立的标杆加以保护，

防止有轮交通工具行驶。有时把用大圆石或细砾铺筑的路面换成石板路，虽然这时大多数大城市的主要街道都陆续铺设，但在十八世纪末对筑路原理还没有较透彻的了解，因而一直没有找到确定的解决方案。

在大城市的一些主要街道上，开始出现用动物油脂小蜡烛照明。但因为这种蜡烛很贵，所以不普遍。在采用煤气照明之前，人们通常不得不举火把或手提灯笼为自己照路，从这时起对街道卫生有所注意，但往往资金不足。房主们既不能也不乐于执行当地所订的规章和保持他们房屋前路面的清洁。德弗洛西斯等人（1551）想建议用水冲刷街道，但在很长时间内缺乏供这种用途的水。

实际上从罗马时代的导水管失修以来，大多数大城镇已无足够的供水。在大多数情况下，房主人只能使用自己的水井或公用贮水池作为水源。有时修复古老的沟渠对这类贮水池供水，但更为经常的是把泵安装在桥附近，把河水抽入供水系统。其中之一例就是佛兰明工程师林蒂利尔在亨利四世统治期间为巴黎的“新桥”安装了一些水轮，经过木管和铅管组成的系统向该城市供水。此系统因安装新的抽水泵和修复其他的导水管而得以扩大，因而1600年左右巴黎由河道和导水管获得数量相当多的水。这是十九世纪前大多数欧洲城镇的典型状况。

排水系统的情况也是这样。再以巴黎为例，我们发现下水道尚未系统修建。缺少足够量的水来供定期冲洗，已构成十六世纪严重的威胁。1663年一份论及下水道状况的报告揭露了这方面的可怕现象，于是开始了较为系统的检修和清洁工作。但仍感到此项专用公款不敷使用，且检修工作远不能使情况有实质性的改善。但这时人们已经很清楚完善的排水系统和传染病蔓延之间的关系，在公众舆论的影响下，最终导致十九世纪初对排水系统的改善。总之，这是一个过渡时期，这时许多问题都已认清并且提出了适当的改进措施，但是社会和经济条件尚不能使公共福利有确实的改进。

# 第十七章

# 牛顿以后的力学

## 作为一门独立学科的力学

直到十七世纪，力学才成为一门全面研究运动的学科，在自然科学领域占据中心地位。在这以前，力学只不过是一个次要的知识部门，它限于讨论物体在力作用下平衡的基本问题以及它们在简单工具方面的技术应用。这一世纪最伟大的科学家（只指出几个人，伽利略，惠更斯和牛顿等）都集中在这个学科，而当时在数学方面取得的巨大进展，也帮助了他们。由于他们的努力，力学所达到的完善程度以至于其它知识领域只有与力学结合时，才能比得上它，例如天文学。此外，力学在自然哲学思想领域中，也起了支配作用。从而产生了一种知识的新概念，这种概念可定义为自然界的机械论观点。哲学家寻求用力学术语来描述自然界的运动，并以力学理论为基础来解释它。其后果是力学在自然科学中获得了一种特殊的地位：把它作为科学的基础，甚于当作科学的一个分支。这种观念由于力学愈来愈适于进行数学处理的事实而加强了，表现在两方面。首先，正如牛顿已阐明的，力学是一种公理化的结构；其次，力学问题可用代数方法定量地解出。因此，不再把力学看成是物理学的一个部分，而看成是数学的一个分支，这种情况

不足为奇。毫无疑问，力学与象热学、声学或电学这类学科的距离超过了和几何学的距离。

从十八世纪初直到完全进入十九世纪，力学在自然科学领域中一直保持它的特殊地位。这种影响的痕迹直到今天仍然可见。力学的显著数学特征对于具有数学天赋的科学家和纯数学家们都有一种强大的吸引力。这反过来又加强了它的数学特征，更进一步扩大了力学和实验物理学之间存在的鸿沟。诚然，机械论自然观这一概念的确切含义是什么，意见并不一致，但这并不能改变这个事实，即大家都仍然使用这个概念。

因为更高深的数学远远超过本书范围之外，故牛顿之后力学的综述将只限于提出一个比较基本的轮廓，当然对于这样一门综合知识领域的丰富宝库来说不是非常恰当的。此外，处理问题的方法还必须适合于十八世纪力学的两个特点：

第一个特点是，力学科学家们的研究工作之间存在着紧密的联系，这些科学家人数较少，而其中大多数都是伟大的数学家。第二个特点是，这些科学家的首要目的是使某些普遍原理公式化，这些原理在推导命题时被作为假说以及用作解题的工具。本章的目的是将这些原理集中在一起进行考察，并防止讨论脱节和重复，我们打算逐一研究每项原理，但是事先对研究工作者本身的生活和工作做一简略的叙述。

## 莱布尼兹（1646—1716）

高特雷德·威廉·莱布尼兹和牛顿同时发明了微积分，他努力将微积分应用于力学领域。他从事力学研究与他在形而上学领域内的研究密切相关，这里我们不能详细研究这种联系，只需提到从他的哲学研究得到的许多概念中的两个：（1）活力和(2)死力。一个运动物体的活力是该物体发挥作用的能力由其运动的结果，它被认为和物体的质量及速度平方成正比。死力是物体静止时作用于基点上的力，它仅是重量的一个同义语。莱布尼兹

为《学者文集》（1682年在莱比锡首次出版的一种期刊）写过许多力学论文，关于这个课题也写过许多单独的论文，其中一篇题为《动力学实例》（1695）。他恢复了同行科学家们公开争论的古老习惯，用这种方法解决问题，从而促进了力学的研究。

雅克·伯努利（1654—1705）是莱布尼兹在1684年提出的微积分的第一批拥护者之一，他第一个向其同代人阐明了莱布尼兹的发现，在协助改进微积分方面做了比别人都多的工作。

在提出解决力学问题方面，他起了极其重要的作用。由于解决了他弟弟让·伯努利的有名的“最速降线”（即在重力作用下从一点到另一点的最快下降曲线问题），以及由他自己所建立的等周问题（即在给定周长下求所包围的面积为最大的曲线及有关问题），因此，他有资格被认为是变分学的奠基者之一。

让·伯努利（1667—1748）是雅克·伯努利的弟弟，他的著作对进一步改进微积分作出了贡献，他的光辉发现促进了纯数学和力学的发展。欧洲的知识界竞相以他们的智力才能参加论战，让·伯努利在其中起了领导作用。他第一个提出虚速度（或虚位移）原理的普遍公式。和他哥哥一样，他也没有留下有关力学的纲要。

丹尼尔·伯努利(1700—1782)是让·伯努利的儿子，写了许多促进力学发展的论文。他对整个物理学的最重要的贡献是他的著作《流体力学或关于力和流体运动的评论》，书中，他进一步研究了作用于流体的力或流体所产生的力。在此之前伯纳德托·卡斯特利（《论流水的测量》，1638）、托里拆利（《实用几何学》，1644），和马略特（《关于水流动的论文》，1684），都曾进行过这方面的研究工作。这本著作中也包含了气体动力学理论和热的能量概念的基础。

皮埃尔·瓦里尼翁在他的著作《新力学 方 案》（1687）和《新力学或静力学》（1725）中，对静力学作了有价值的贡献，他清楚地认识到力平行四边形定律的基本意义。在今天的教科书

中，仍然包括他对这个命题的证明，即两力作用于它们平面内一点的力矩和等于合力对该点之力矩。

皮埃尔—路易斯·莫雷·德莫泊丢在1744年作为特例，并在1747年作为普遍原理提出了最小作用原理。但萨穆埃尔·柯尼希坚持认为远在1707年，在莱布尼兹给赫尔基的信中已经阐明过这一原理。根据柯尼希的说法，莱布尼兹曾说过作用量也可为最大值，故一般说来具有极值。我们并不因柯尼希揭露出来的事实而动摇原有的看法。

莱纳德·欧拉（1707—1783）是有史以来最伟大的数学家之一，他在十八世纪的数学和力学的发展中起了显著的作用。他的内容渊博的教科书使他实际上成为其后各代数学家的老师。他的《分析力学或分析的运动学》（二卷本，1736）是第一部系统的力学教科书，在这本书中，我们看到牛顿经常用以排斥所有其它方法的几何方法已被分析法所取代。这是一种转变，力学问题的处理变得更加清晰。欧拉对变分法的改进及其在力学领域中的应用方面的贡献均包含在他的《具有极大值或极小值性质曲线的求法》（1744）一书中。在他的《固体或刚体的运动理论》（1760）中，他阐述了一种研究刚体运动的分析方法。对于电学、流体动力学和天文学的研究，他也做出了重大贡献。

亚历克斯·克劳德·克莱尔特主要由于他的专题论文《地球外形的理论》（1743）而出名。在论文中他宣布了著名的克莱尔特定理。这个定理涉及赤道处旋转椭球表面上各点的重力与压力和离心力的关系，文中也论及了毛细作用的理论。此外，克莱尔特对流体静力学和天文学的研究也做出了有重要意义的贡献。在他的著作中首次指出力函数或势的概念，在以后的物理学中，这个概念变得非常重要。

让·勒·隆德·达兰贝尔由于对不朽的学术巨著即《科学、艺术及手工艺的理论字典百科全书》所作的许多贡献而闻名于十八世纪。总的说来，他对精确自然科学作出了杰出的贡献。他的

《动力学论著》（1743）在力学领域中是很出名的，书中以公式化形式提出了“达兰贝尔原理”。他的哲学著作涉及的课题之一是力学认识论的地位问题。他提出了这样的问题：力学原理是必然的还是从属的？换句话说，力学上的发现能否象数学一样可以从明显的原理中推导出来，以致我们不可能以其他方式提出这些发现；或者它们依赖于对我们来说并非一定要出现的经验事实。简单地说，力学是数学的一个分支抑或是一门经验的科学？达兰贝尔的回答是断然地赞成前者。

和他的大多数同代人一样，达兰贝尔也从事流体动力学及微积分在弦振动问题上应用的研究。

帕特里克·库特·达赛是一个在役的法国陆军元帅，巴黎科学院院士。他在《科学院回忆录》上写了一些有关力学的专题论文。

约瑟夫·路易斯·拉格朗日的伟大著作《分析力学》（1788；1822），使他在力学史上处于核心地位。在此书中，他提出了动力学的一个普遍原理，这个原理是由虚位移原理和达兰贝尔原理相结合而得到的。该书引人注目之处在于完全排除牛顿的几何方法，而采用严格的分析方法。在前言中，作者本人特别提醒一个事实，即书中没有一张几何图形，此外，他的目的是使力学成为一门新的解析分支。在流体动力学、天文学和变分法等其它专门学科内，拉格朗日也做了重要的贡献。

## 关于力的量度的论战

在讨论力学的普遍原理之前，我们对下述两方面作一概述：一方面是十八世纪上半叶的力学状况，另一方面是笛卡儿学派和莱布尼兹学派之间激烈进行几十年之久的论战，争论什么是运动物体力的正确测量方法。如果不作适当的解释，现代的读者就不可能了解这种表述的意义。按牛顿力学的说法，他把力认为是作用在物体上的一种效应并赋予物体以加速度，所以他把力看作是

物体速度变化的原因，不论是速度大小的变化或者方向的变化，或者二者同时变化。因此，对于“一个物体的力”这句话不能赋予任何意义。但是，十七、十八世纪的科学家们并不是从这个角度去探讨问题的。一个正在运动中的物体具有使另一物体运动的能力，例如推开它或者使它向前滚动，以及克服阻力的能力。运动中物体产生上述效应的能力被称为它的“力”，显然，问题是“这个力决定于那些量，以及它是如何依赖于这些量的？”笛卡儿认为，力是中世纪叫做冲力的量，是由物体的质量与速度的乘积决定的。通常笛卡儿把这个量称为“运动”，偶尔也叫做“动力”，而从牛顿那儿接受过来的正式术语是“动量”，尽管实际上他也称之为“运动”。与这个概念一致的是笛卡儿自然哲学的基本原则（一种以上帝不变性为基础的形而上学假设），即在所有物质过程中，所包含的一切物体的总力不变。即

$$\Sigma mv = 常数$$

1686年莱布尼兹对笛卡儿的这一原则挑起论战，他在《学者文集》中，发表了题为“简论笛卡儿和其他人在估价物体的运动力方面的重大错误”的论文。他认为物体的力不决定于乘积 mv而决定于量值 $mv^2$，并认为在所有自然过程中保持不变的不是$\Sigma mv$，而是$\Sigma mv^2$，即总的活力。莱布尼兹的这个论断引起了著名的“活力之争”，此后的几十年内，科学家在这场争论中划分成不同的学派。莱布尼兹论证的要点是：当质量为m的物体从高为 h 处下降时，储存了大量的力，以致于当它的运动方向相反时，它将能返回高为h处。根据约丹纳原理，同样的力能使质量为$\frac{m}{n}$的物体升高到nh处；而在降落时，物体必储存同样的力。

但是按伽利略落体定律，如果第一个物体返回地面时的速度为 v，则 第二个物体的速度为$\sqrt{n}\,v$，所以这两个力的比例如下：

按照笛卡儿的理论：$mv \Big/ \frac{m \cdot \sqrt{n}\,v}{n} = \sqrt{n}$

按照莱布尼兹的理论：$mv^2 \Big/ \frac{mnv^2}{n} = 1$

然而，二力应相等，因此笛卡儿的假说是错误的。

我们不打算研究由莱布尼兹的论证所引起的许多讨论，只要回忆一下达兰贝尔所作的简单观察，即可彻底解决这场论战。达兰贝尔的观察用现代的术语可表示如下：

当质量为m速度为 v的物体受到阻力K的作用时，经过一段路程 s和时间t后，它就停了下来，应用下述方程：

| 一方面 | 另一方面 |
| --- | --- |
| $Ks = \frac{1}{2}mv^2$ | $Kt = mv$ |

因此，量值$\frac{1}{2}mv^2$决定了在力K的阻滞下物体运动能保持多远；而量值 mv 则决定物体运动能保持多长时间。如果把运动物体的力看作是表明某个量值，在阻力影响下，根据这个量值决定

在多大的距离<br>在多长的时间间隔 } 内，物体将保持运动状态。

则这个力可用$\frac{1}{2}mv^2/mv$来表示。在十八世纪，此算式中没有系数1/2，因为那时的科学家还不曾使用公式而只是用文字表示比例关系。按照莱布尼兹的观点，力和乘积 $mv^2$成正比，结果就用这个量值来表示力。值得注意的是，在引入$mv^2$作为力的量度之后，他立即用 $\Sigma mv^2$为常数的守恒定律来代替笛卡儿的$\Sigma mv$为常数的守恒定律。正象笛卡儿一样，他也确信世界上力的总量必须保持不变，只是力的表达方式不同罢了。

当然，莱布尼兹非常明白在物质过程中总的活力通常并不完全保持不变，例如当两物体作非完全弹性碰撞时，总的活力就减少。但是，他认为这种减少只是外观看来比较明显，实际上活力并没有损失，它只不过是部分地被碰撞物体的最小微粒所吸收，这些微粒的活力值增加了。如果他再前进一步说，它以热能形式出现，那么他就抢在十九世纪热学理论的一次伟大发现之先了。但是，他只是停留在这个无法验证的论断上，即被最小微粒所吸

收的活力损失于碰撞物体中，而不是——从绝对意义上来说——损失于宇宙中。

## 十八世纪的力学原理

**质心守恒原理**　这就是牛顿在《原理》(公理，推论 4)一书中所提出的命题的名称。它指出物体组重心(质心)的运动不受这些物体相互作用的影响。如果只有内力而没有其它力的作用，那么质心将保持静止或作匀速直线运动。如果有外力作用，质心的运动就好象一个质点一样，此质点上作用着所有的外力，它的质量等于所有物体的总质量。上面提到的守恒原理是这个定理的特殊情况。对于普遍原理来说，更合乎逻辑的名称应当是“质心运动原理”，实际上这是目前力学著作中的名称，人们将发现，这个陈述适用于许多其它方面。

### 动量矩守恒原理或面积原理

这个原理是牛顿定律(《原理》1，命题1) 的一个推广，它大约在1745年由丹尼尔·伯努利、欧拉和达赛三人同时提出，虽然表示的方式稍有不同。该项牛顿定律指出，一个质点在指向一固定点的力的影响下，其半径（由中心点出发）在相同时间内扫过相同的面积。这个原理的普遍形式表述为：一个系统只在内力作用下运动时，各点对中心的动量矩之和为常数。因为一点对某中心的动量矩也等于这点对该中心的扇形速度，所以这个原理也称为面积原理。和前面情况一样，这里的守恒原理也是一个更为普遍原理的特殊情况，这个普遍原理描述外力存在时发生的情况，这时动量矩之和的时间变化率等于作用力的力矩之和。这个原理可称为动量矩原理。

### 活力守恒原理

这个名称也是一个普遍原理的特殊情况，但也用以表示这个

普遍原理本身，它涉及以后活力原理或能量原理的名称。其最初的形式表述为：作用于系统上的力在某时间间隔内所做的功，等于同一时间间隔内系统活力增量的一半。直到柯利奥利斯之后才开始把活力（动能）认为是$1/2mv^2$，而不是$mv^2$，这个原理才第一次获得它的确定的形式，即所作的功等于动能的增量。

在没有外力作用的特殊情况下，活力保持不变，这时，也只有在这时，我们才能谈到守恒。由于惠更斯研究了这种情况，所以这个原理的普遍形式通常归功于他。不过，正如我们所知，他使用了一个更为普遍的原理，这个原理相当于保守力场中的机械能守恒原理。由于下降而得的瞬时速度在这里可认为用于使系统不同部分得以垂直上升（其结果质心必然在系统初始位置的高度再次趋于静止），因此丹尼尔·伯努利提出实际下降和势能上升等同原理。他特地将这一原理用于流体动力学问题。

惠更斯原理和机械能守恒原理的等价性适用地球引力场（假定场是均匀的）中的运动。在某种更普遍的意义上说，当外力具有所谓力函数或势时，即当力沿各坐标轴的分量只是某个位置函数在相应坐标轴方向的偏微商时，这种等价性适用于一切场合。势的概念在物理学的发展中是非常重要的，它在丹尼尔·伯努利、欧拉和克莱尔特的著作中逐步演变，直到1773年由拉格朗日最后将其纳入力学。只有从那时起，才可能正确地建立机械能守恒定律的适用条件。

虚速度原理（虚位移原理，虚功原理）

这个原理具有悠久的历史，在亚里士多德推导杠杆平衡规律中已找到它的萌芽。在约丹纳学派中再次发现过它，我们也能确定它存在于伽利略的著作中。在1715年，让·伯努利给瓦里尼翁的信（该信件于1725年由瓦里尼翁在他的《新力学》中发表）中，这个原理才获得明确的、普遍的公式化表达。如果将表达方式稍加现代化，则可重新陈述如下：在质点系中一点Pi上作用一力Fi，给这点一个微小的位移PiQi，将Qi投影到Fi的作用线上得到点Ci，

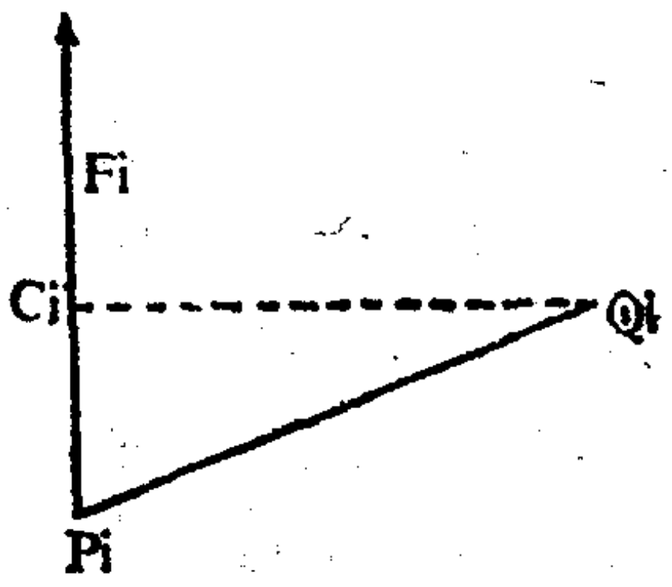



图21.虚速度原理

作出乘积Fi·PiCi，乘积的正负视PiCi和力Fi的方向相同或相反而定。对各点都进行这样的运算，并注意所给的位移要符合系统所受的约束条件。如果系统处于平衡态，则有 $\Sigma Fi \cdot PiCi = 0$。伯努利把 PiCi 叫做力 Fi 的虚速度，把乘积Fi·PiCi叫做能量。今天我们称 Fi·PiCi 为力Fi的虚功，并说系统各点在无限小位移中所作的总功为零。于是这个原理通用"虚功原理"的名称。我们也称虚位移，而术语虚速度也仍在使用中。对于这个虚位移原理，拉格朗日引入方程：$P \cdot \delta_p + Q \cdot \delta_g + R \cdot \delta_r + \cdots\cdots = 0$，式中P、Q、R等表示主动力，而$\delta P$、$\delta_g$、$\delta_r$等表示作用点的虚位移在力作用线上的投影。他称$\delta P$等为坐标的变分，乘积$P \cdot \delta_p$等为虚力矩。上面的表达式成为他的纯分析力学结构的一个基本公式。

## 达兰贝尔原理

如果按达兰贝尔本人提出的表达方式来陈述以他的名字命名的原理，那末对今日的读者可能存在困难，故采取现代方式阐明如下。

设Pi为系统的一个质点，Ki为作用其上的力。如果只存在Pi，那么沿Ki作用线方向将产生一个加速度，但是由于它和其它质点的联系，结果使 Pi 得到一个不同的加速度，这个加速度可以想象成作用在自由质点Pi上的某个力Li所产生。将 Ki 分解成分力 Li 和 Mi，于是质点系之间的联系可看作是

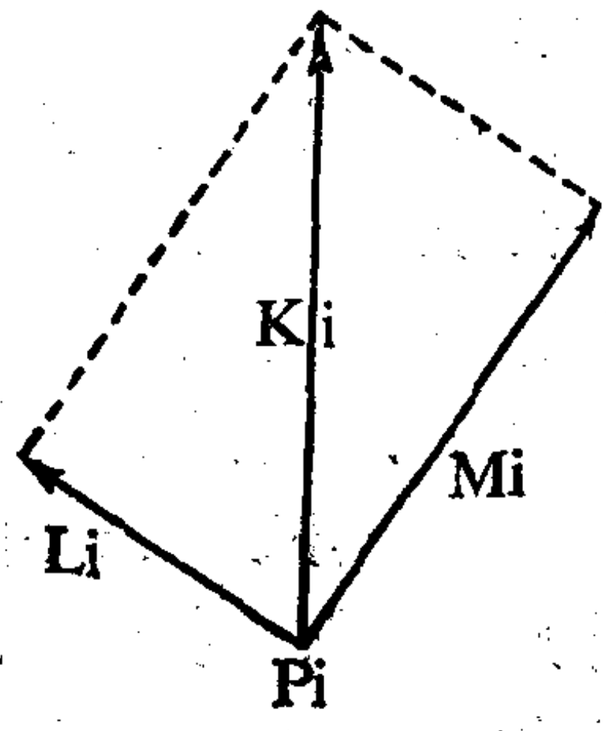



图22　达兰贝尔原理

对于力Mi的破坏，因而这个力称为损失力。所以达兰贝尔原理可表示为：在受力作用的质点系中，损失力形成一组平衡力系。

因为Mi是Ki和Li的反方向力的合力，故此原理又可用另外方式来表述。称Ki为作用在Pi上的主动力，Li为有效力，这样该原理可表述如下：由主动力和有效力的反向力所组成的力系是一组平衡力系。

## 拉格朗日方程式

由于拉格朗日用这种方式表达达兰贝尔原理，并对刚才讨论过的力系应用虚位移原理，且全部以分析方法表示之，因而他获得了用于整个动力学领域的普遍原理（静力学作为一种特殊情况包括其间），这个原理是：

$$\sum_{i=1}^{i=n}\left\{\left[X_i-m_ia_{xi}\right]\delta_{x_i}+\left[Y_i-m_ia_{yi}\right]\delta Y_i+\left[Z_i-mia_{zi}\right]\delta_{Z_i}\right\}=0$$

式中Xi，$y_i$，Zi表示作用在Pi点的力的诸分量，$m_i$ 是该点的质量，$a_{xi}$，$a_{yi}$，$a_{zi}$ 是它的加速度诸分量，$\delta_{x_i}$，$\delta_{y_i}$，$\delta_{Z_i}$ 则表示它的虚位移诸分量。

在这个方程中，对各个主动矢量仍然采用沿三个坐标轴分解的方法。由于引入矢量分析方法，其结果可更简洁地表述如下：

$$\Sigma\left[\overline{F}_i-m\bar{a}_i\right]\delta\tilde{r}_i=0$$

当然尚待解决的问题是，怎样从这个所谓拉格朗日动力学普遍方程中，推导每个具体情况下的特殊运动方程。他本人对此提供了几种方法，其中之一导致以他的名字命名的第一类微分方程。

在这些方程中，系统各点的位置由彼此相互联系着的正交坐标点决定。于是拉格朗日指出，如果利用数目恰好等于系统自由度数的另一组参数去代替上述坐标，那么，常常会带来好处。这

些所谓的广义坐标当然是相互独立的，然后他将普遍方程变换成包含这些新变量的方程。此外，他还不得不引入所谓广义力，它的意义不象新的坐标那样是坐标面的距离，不再是牛顿力学术语意义下的力。通过这种方法，他建立了一套完全新的运动方程组——第二类拉格朗日方程。有了这一简要的说明，我们可以把这个较为重要的发展先搁置一边。

## 最小作用原理

这是一个所谓积分原理，它含有从运动整体的观点表示运动的意思。最小作用原理赖以建立的思想观点的发展可以追溯到经典自然哲学的一个普遍命题，它断言自然界从不作没有理由或没有一定目的的事。在这里所发现的信念无疑经常在历史进程中出现，但通常叙述成这样的形式：自然界总是力求尽可能用最简单的方式获得某种效果。

在古代，这个原理在光线的直线传播中已经找到一个例证，第二个例证是在希罗的命题中，认为从某一点出发的光线被平面镜反射后到达眼睛（或者按照古代的一种光学理论，光线走相反的路径），是遵循由光源至眼睛（或与此相反）之间可能有的最短路径。正如我们已经看到的，费尔玛（1608—1665）在十七世纪已证明了光线折射时，光从一种介质中某点到另一介质中的某点所花的时间取最小值。这里假定从第一种介质传递到第二种介质时的折射率等于两类介质中光速之比。莫泊丢在1744年首先提出思路类似的原理，他相信这个原理支配着自然界的一切运动。他把质量、所通过的距离和速度三者的乘积理解为动点的作用量，然后认为在任何实际上发生的运动中，这个乘积总是比相同点之间可想象的但实际不会发生的其它运动为小。按照自己的看法，他成功地由这个原理推导出光的折射定律、两物体碰撞法则和杠杆定律。作为一个例子，我们将概述折射定律的推导过程。

光线自介质 1 中的A点经过C点射到介质 2 中的 B 点，设

$AC=S_1$，$CB=S_2$，$AA_1=a$，$BB_1=b$，$A_1B_1=c$，和$A_1C=x$，则总作用量是

$$s_1v_1+s_2v_2或v_1\sqrt{a^2+\chi^2}+v_2\sqrt{b_2+(c-\chi)^2}$$

上式对χ求导得

$$\frac{xv_1}{\sqrt{a^2+x^2}}-\frac{(c-x)v_2}{\sqrt{b^2+(c-x)^2}}或\frac{xv_1}{s_1}-\frac{(c-x)v_2}{s_2}$$

其为零的条件

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{\frac{x}{s_1}}{\frac{c-x}{s_2}}=\frac{\sin i}{\sin r}=n_{1,2}$$

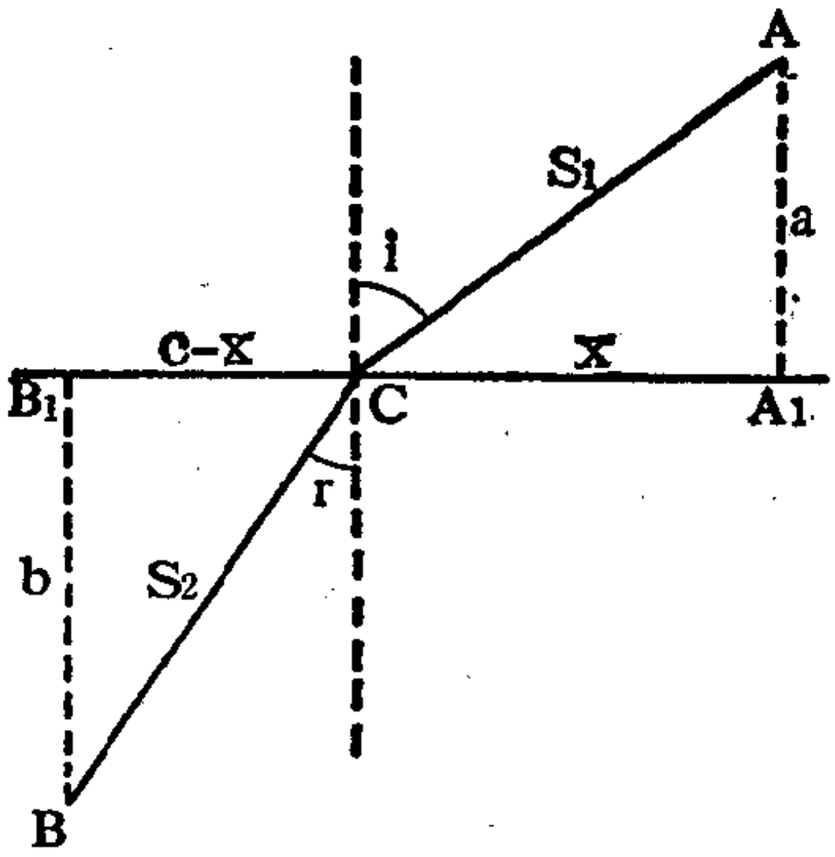



图23最小作用原理

和笛卡儿提出的关于在不同介质中光速之比的假设相一致。当然用这种推理方法根本不能提供令人确信的证明，特别是无法澄清所假设的极值必须是一个极小值。我们既不打算陷入神学的牵连之中，按照莫泊丢的看法这个最小量值与神学有关；也不准备加入轰动一时的与伏尔泰的争论，这个争论是由于这一原理的陈述所引起的。后来，欧拉以数学形式将这个原理表示如下：(《发现的方法》附录Ⅰ)

$$\delta\int v\,ds=0$$

它表示与邻近的假设路径相比，实际路径的$\int v\,ds$为稳定值，这样一来，这个原理就可用变分法来处理了。同时欧拉提出了一个原理的有效性条件，这就是v必须决定于s，例如当存在空气阻力时情况就不是这样；但在机械能守恒定律成立时，情况就是如此。

然而，还没有得出最小作用原理有效性的证明，直到这时这个原理也只限于单个质点的运动。拉格朗日提供了这个原理的证明，从他的动力学普遍方程式出发，他推导了这个原理。同时，这个推导也适用于质点数为任意的、彼此相联系的并以力相互作用的系统。不管怎样，有效性条件是得到了，即对于真实运动和假想运动来说，机械能守恒定律都必须成立。最后，他把这个原理表述为：

$$\delta\Sigma m\int v\,ds=0$$

以上决不是十八世纪力学普遍原理的详尽无遗的论述，这些原理曾以不同方式相互联系，也有不同形式表述。

## 力学的进一步发展

十八世纪末和十九世纪初，力学的进步不仅是因为上述最一般原理的研究，还由于许多作者对这门学科作出了更具体的贡献。本节就专门论述其中的某些贡献。

尼古拉·卡诺，他的最重大的影响是在政治和军事领域（在1792年，他被称为“胜利的组织者”），由于他的著作《关于普通力学随笔》，使他在力学史上具有重要的地位，这本著作在1803年以“平衡和运动的基本原理”为题，以内容更为广泛的版本再版。书中他系统地提出了力学的基本原理，对运动学——一种脱离物理原因的运动理论作了专门的论述。他相当注意机械能守恒定律和永恒运动的不可能性。非弹性物体碰撞时活力损失的一个定理就是以他的名字命名的。在考虑力学的认识论性质时，卡诺抛弃了欧拉和达兰贝尔的单纯唯理主义的方法，他强调存在于力学基础之中的经验要素。然而他承认，基本定律一方面非常紧密地和理性相一致，另一方面又非常清楚地表现于日常经验之中，这就难以决定，我们关于定律的有效性的坚定信念应该归之于两种知识来源（理性的和经验的）的哪一种。

古斯塔夫-加斯帕尔德·柯里奥利是重要论著《论固体力学和

机器效率计算》(1829；1844) 的作者。他在实际使用中用$\frac{1}{2}mv^2$表示一个运动质点的活力，这样他的能量方程就可表达成：力所作的功等于系统活力的增量。

在研究相对于动坐标系的运动时，如果把这个坐标系作为固定的来看待，那么我们就必须假想有两种附加力，其中之一即以他的名字命名——柯里奥利力，这个力垂直于相对速度并和相对速度的大小成正比。

路易斯·潘索是一位非常重要的法国力学著作的作者，他的《静力学基础》(1803) 一书尤为著名，在这本书中他发展了力偶理论。这个理论的重要性可由长期以来“力偶”概念已成为力学要素之一的事实清楚地得到说明。在“论矩和面积构成”的论文（1806年，后来作为附录收入《静力学基础》一书中）中，他提出这样的基本定理，即质点系对某一中心总动量矩的时间变化率等于作用力对该中心的总力矩。

在他的“物体转动的新理论”(1834，在利乌维尔期刊1851年16期中详加阐述）中，他提出了著名的描述具有定点的刚体运动的方法，即使两个具有公共顶点（在该固定点上）的圆锥之一沿另一个滚动的方法。他把刚体的一般运动设想为一个螺旋运动，或者说绕瞬时轴的转动和沿瞬时轴的滑动。

虽然让·维克多·鲍赛莱特（1788—1867）主要由于创立了投影几何而闻名于数学史，但在力学史上也占有一席之地。他的贡献之一是集中注意作为力学基础之一的“功”的意义，他还曾提出使用千克—米单位制。许多法国学者以自己的论文和教科书对力学的发展作出了贡献，其中我们只提到两位：西梅奥-德尼斯·泊松（1781—1840）和安德烈-马力·安培（1775—1836）。

## 普遍原理的进一步发展

在力学中建立一般原理的目的到了拉格朗日似乎已经完成，

但在十九世纪，这一目的再次鼓舞着一些杰出的科学家。

高斯在1829年提出作为力学基础的最小约束原理，他并不打算提出一种本质上的新起点，而只是指出如何从不同于当时所采用的、更为有利的角度来观察力学过程。

高斯注意到位移PiQi和位移PiRi之间的差异，这里PiQi是体系中一个质点Pi在某一很短时间间隔内的真实位移，而PiRi则是假定该点的运动不受其它质点的阻碍而将产生的位移。RiQi表示由于该点受约束阻碍而产生的偏离。这样最小约束原理可表述为：如Pi的质点为mi，则乘积。

$$\Sigma m_i \ (Q_iR_i)^2$$

与任何其他可能运动（在给定约束条件下）相比为最小。

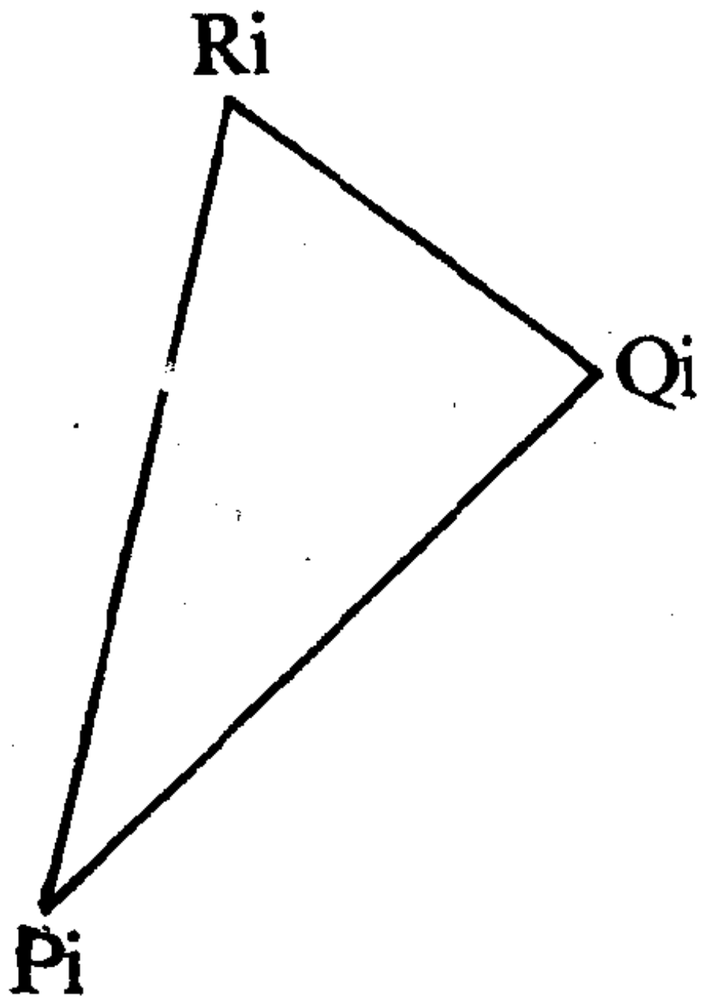



图24　最小约束原理

爱尔兰数学家和天文学家威廉·哈密顿(1805—1865)在力学普遍原理领域中的研究有着非常重大的影响。哈密顿和十八世纪的联系是最小作用量原理，他宁愿把这个原理称之为“稳定作用量原理”，因为作用量不一定必须为极小值。他用一个新的原理—变作用量原理——来代替这个原理，并表达如下：

$$\delta\int_{t_0}^{t_1} (T-U)\ dt=0$$

式中T是所观察质点的动能，U是它的势能，（T—U）既为拉格朗日函数，又可称为运动势——由赫尔姆霍茨所提出的一个术语。机械能守恒定律采取如下形式

$$T+U=H$$

哈密顿这个理论引起了极广泛的数学讨论，其中德国的数学家卡尔·古斯塔夫·雅克·雅可比（1804—1851）起着主导作用。所有这些都是“分析动力学”的一部分，分析动力学这个学科随着

我们在力学发展中经常注意到的倾向，它本身已变成数学的一个分支。哈密顿和十八世纪理论相联系的另一个成果是将几何光学纳入他的力学范畴，他把这两门学科紧密地结合起来，对于以后数学物理学的发展起着重要作用。哈密顿和德国数学家奥古斯特·费迪南德·默比乌斯（1790—1868）和海因里希·京特·格罗斯曼（1809—1877）一起参与创建所谓直接计算法，这种方法现在应用在矢量分析中。在这些方法中，物理量本身以符号表示，并对它们作数学计算。其结果要比坐标几何方法所能提供的处理方法更为简洁和生动。

## 对牛顿力学的评论

随着拉格朗日《分析力学》的出版，尤其是以后十九世纪分析动力学的发展，产生了一种看法，就是认为以牛顿《原理》为基础的力学实质上已趋完善。可是，随着对这门学科内容的叙述逐步完善，整个结构赖以建立的基础也在不断地受到批判性的审查，同时关于这些问题的讨论也从未真正停息。力学著作的作者们不止一次地发现他们自己不得不去研究象“力”和“质量”这些词的真实含意，牛顿的几项公理是如何提出的？他的绝对空间和绝对时间的概念在什么范围内能站得住脚？这些讨论往往是深奥的，参加讨论的许多学者中有些我们已经提及，如欧拉、达兰贝尔和卡诺，另一些人是：

阿·巴雷·达赛安特·韦安特特别反对把力作为加速度原因的含糊概念（这类概念……既不是物质的也不是精神的，而是盲目的和失去判断力的……），在他的著作《建立在运动学基础上的力学原理》（1851）中讨论了这个问题。

弗·雷什在他的《物体一般韧性和弹性力学基础教程》（1851）中，得出在力的概念和拉伸绳索概念之间存在密切联系的看法。他的学派名称“绳索派”就来源于这种思想。

古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫，（在第二十一章中研究他在

光学领域中的重要著作时我们将会再次提到）在他的《关于数学物理和力学的研究报告》（1874—1876）中提出一种力学的逻辑综合。他的观点是，这门学科（以及一般说来数学）的目的是对自然现象作出尽可能精确的公式化描述。力学不能提供一个完全真实的力的定义，而必须把力限于只作为质量和加速度的乘积。

十九世纪最重要的经典力学评论家是奥地利的物理学家和哲学家恩斯特·马赫，他的论著《历史发展中的力学》（1883）曾多次再版并译成多种语言。他在历史的框架内发展了他的评论。其中特别研究了质量的概念，作用和反作用原理，以及绝对空间和绝对时间的概念。这部著作具有明显的反形而上学的性质，它包含一种科学哲学，这种哲学受到所谓经济原则的支配（科学的目的是用我们的头脑中更易操纵的图景去代替经验资料）。

物理学家海里希·鲁道夫·赫兹在他的著作《力学原理的新关系概论》（1894）中提出了一种崭新的力学系统，书中完全避开力的经典概念。

最后，我们在这里必须提到法国数学家亨利·彭加勒在他的《科学和假说》（1903）及其它著作中对力学所作的广泛和有影响的、批判性的观察。

十九世纪末，诸如上述的评论已经引起一些自然哲学家的怀疑，牛顿力学是否是这个领域的最终语言，它是否真是唯一可能的体系？但是另外一些人继续把它看作是永恒的真理。至于论述第一部分人的怀疑在多大程度上已被二十世纪初的相对论所证实，则不属于本书的范围。

# 第十八章

# 热　学

## 热是什么？

冷和热这两个词习惯上指两种完全相反的感觉，也经常表示对这两种感觉物理原因的推测。如果一个物体能对我们产生冷或热的作用，就推测它是冷的或者热的，或认为它包含冷或热。正如我们在第二章中已看到的，在亚里士多德的哲学体系中，冷和热都属于基本的性质，它们和干与湿一起构成四元素。

在自然哲学家们最终得出更加符合近代自然科学原则的冷和热的概念以前，经历了很长一段时间。直到十八世纪，自然科学才区分开热量和热的强度（温度）；而“冷”这个术语，直到十九世纪才从自然哲学家的词汇中最后消失。当力学已经达到能够计算行星运动，并可以用公式表达许多动力学普遍原理的阶段时，那时的热学理论，即使以目前最基本的物理教育标准来判断，仍然处在原始的水平。

但不能就此认为从很遥远的时代以来，对于热的本质问题不曾提出过许多思想和讨论。有两个主要的思想流派：一派认为，热是物质，是独立存在的东西，在物体内它的存在使物体本身产生温暖的感觉。另一派认为，热是物体的一种偶然状态，当

人和该物体接触时，这种状态使人体验到热的感觉。在整个十七世纪都相当普遍地认为，热是由物体的最小粒子的运动而形成的。这种趋向的特征，由约翰·洛克做了下列的说明："热是物体中各部分难以察觉的非常活泼的搅动，它使我们产生感觉，从而我们称这个物体是热的；所以我们所感觉的热，除了物体中的运动以外，别无其他。"后来，焦耳把这一说明当作题词放在他关于热的机械说的一篇主要论文的前面。这种观点可以成为约翰·丁铎尔著作标题《热是一种运动形态》（1863年出版）的注解。

在我们看来，这个热的概念是非常现代化的，但在十八世纪，几乎完全被物质说所代替。热的物质说认为存在一种"热质"，加热就是给一定物体增加热质，而冷却则是从该物体放出热质。后来，还形成了可以认为是折衷于两种存在着的概念之间的另一种学说。按照这种新学说，物体的热起因于包含在该物体中的特殊热原子的快速运动。直到十九世纪，纯热质说和折衷的热质说才不得不让位于热是能的一种形式的观念。

## 测温术

从上节可以清楚地看出，为了获得具有科学基础的热学理论史的完整图景，不必追溯到遥远的过去。实际上，可以非常有理由地设想，这一历史起始于一种最古老形式的仪表——温度计的发明，它现在广泛应用在科学和日常生活之中。

我们首先在伽利略时代所用的测温器中看到了温度计的原始形式，虽然这种测温器还不适于测温。仪器所依据的原理，如图25所示。当充以空气、压强较大气压强低的B球温度升高时，b管中的液面下降。虽然有一个带刻度的标尺放在b管的旁边，但标尺刻度的划分是十分任意的。这个仪器的缺点是显而易见的：b管中的液面，也取决于占主要地位的空气压强。整个十七世纪，都使用不同形状和尺寸的这种仪器。b管中的液面容易产生不断的、较小的起伏，它偶而被当作一种永动装置来宣传。

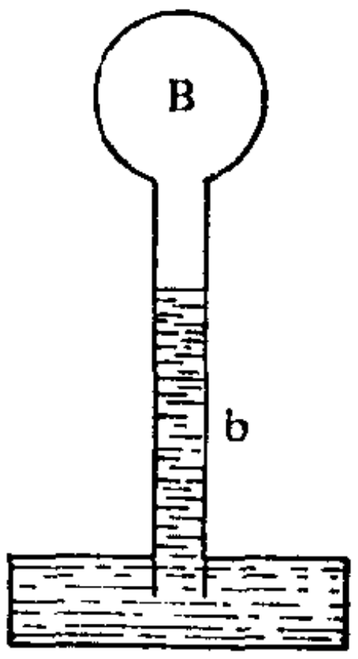



图25 伽利略的测温器

和这个最原始的仪器相比较，由法国的物理学家吉永·阿蒙顿（大约1700年）发明的空气温度计，是一个相当大的进步。即使在这种温度计中，也不能消除空气压强变化的影响。象今天所用的这类液体温度计，是在十八世纪中逐渐演变而来的。可是，那时对用于温度计的液体的选择仍然没有固定的意见，而且在标尺刻度划分上，固定点的选择也依然较少。居住在荷兰的德国人丹尼尔·加比尔·华伦海特（1686—1736）是一个负有盛名的优良温度计的制造者。他的相当不合理的刻度划分在不同范围内一直沿用了几个世纪这一事实，或许最能说明这一点。以水的冰点和沸点作为固定点的百分温标，是1742年由瑞典人安德斯·塞尔絮斯采用的。据说，最初他把100作为冰点，而把0作为沸点，直到七年以后，这些数值才被马廷·斯托墨倒换过来。对测温术史作进一步讨论，是一个费力且需要详细研究的问题，它已超出本章的范围。至于在0和100之间插入数值的精确性问题，直到十九世纪才被提出和加以研究。在十九世纪，关于“绝对温度”这一术语理论上的基本意义，也得到了阐明。顺便提一下，华伦海特当时完全知道水的沸点依赖于气压计的压强，他利用这一事实，制造了温度气压计。后来，这种温度气压计被英国物理学家威廉·海德·武拉斯顿（1766—1828）用作高度计。

## 量热术：两种热学理论

热的定量测定——今天已成为热力学的基本课题——直到十九世纪才开始。关于这一进展，我们主要得感谢苏格兰的化学家和物理学家约瑟夫·布拉克（1728—1799）。他使物理学家们认识到，在温度和热量之间，要画出一条明显的界限；他也引入了

卡路里、比热、热容量、熔解热和潜热等术语。他的研究和由乔治·沃尔夫冈·克拉夫特、乔治·威廉·里希曼、约翰·卡尔·维尔克、约翰·鲁宾逊、阿戴尔·克劳福特以及约翰·加多林等完成的有关工作（这里我们必须避开描述每一个人所起的作用和优先权问题），都是按照热质说理论进行的，并使热质说几乎得到完全普遍的承认。为了描述这个设想的热质，使用了“卡路里”这一术语。

与此同时，热的动力学说还没有完全被放弃。这一学说出现在丹尼尔·伯努利的重要著作《流体动力学》（1738）中。该书与空气弹性的动力解释有关。与当时流行的观点相反，动力学说可归结为分子的相互排斥，伯努利用分子的运动解释这一现象。伯努利假设分子作为完全弹性体向容器壁冲击，他利用数学推理，既成功地推导了波义耳和马略特定律，还论证了压强和分子速度的平方成比例（假定所有微粒的速度都是相同的）。由于假定温度也是和分子速度平方成比例，所以他能从理论上证实由阿蒙顿用实验确立的下述现象：当密闭的定量气体的温度增加某一数值时，气体压强的增加和密度成比例。压强和热的动力学观点尤其得到俄国科学家米哈依尔·瓦西里耶维奇·罗蒙诺索夫（1711—1765）等人的支持。可是当时热质说占优势。热质说拥护者中包括权威的法国化学家安东尼·洛兰特·拉瓦锡，他甚至走得更远，以至于在他的著作《论化学元素》（1789）中把卡路里纳入化学元素表，并且在其关于气体物质分子结构的描述中，也予“卡路里”以重要的地位。拉瓦锡、皮埃尔·西蒙和拉普拉斯由于用冰量热器进行测量，从而对量热术作出了贡献。

量热术的研究由阿·克劳福德扩展到气体。当时各方面的物理学家们都注意到这样一个事实——它对后来热学理论的发展十分重要——即气体在等压下加热比等容加热具有更大的比热。在这一世纪末，美国人本杰明·汤姆逊（康特·朗福德的名字更为

人们熟知，这是本杰明·汤姆逊在巴伐利亚军队中服役时得到的称号。）对热质说提出了批判。朗福德问自己，炮筒钻孔时所产生的相当大量的摩擦热的来源是什么？然后他继续论证，热质说对这个现象所提供的纯系人为的解释，是站不住脚的。为了这个目的，他对所产生的热量进行了广泛的测量。以后，焦耳从这些测量数据中，甚至能够推导出热功当量的数值。尽管如此，我们也没有理由把朗福德纳入热的机械论的追随者之列。他对热的本质所从事的理论上的考察，对热的机械论来说，仍然是太不完全了。他并没有超越热与运动相同一这个相当笼统的见解。热与运动相同一这句话是正确的，在十九世纪，常用其做热的动力学概念的通俗说明，但不能认为它是热的机械论的基本原则的表述。朗福德的工作实质上是批判性多于建设性。他证明，加热金属球时，其重量不变。他从这一现象推论，如果热全然是一种物质，那么无论如何，它必是没有重量的一种物质。在十八世纪期间，曾多次试图对热进行称量，但得到了与事先的设想大相径庭的结果。虽然汉弗莱·戴维的实验支持朗福德对热质说的批判，（他把两块冰放在一个真空泵的玻璃钟罩下面，在一 2 ℃温度下使两块冰相互摩擦而溶化）但这一实验根本没有把热质说驳倒。特别是法国的化学家，著名的克劳德·路易斯·贝尔托莱继续支持热质说。在考察这种情况时必须记住，那时所进行的许多量热实验都充分支持热质说。

## 蒸汽机

在继续论述热学理论的进一步发展以前，我们必须对十八世纪物理学的另一问题予以关注，它对自然科学及其技术应用两方面都是同等重要的，而且通过其技术应用，对世界的社会和经济生活发生了强大的影响。这就是蒸汽机的发明及其进一步的发展。

利用蒸汽的膨胀力起动某种机械装置的企图，可追溯到古

代。亚历山大里亚的希罗的蒸汽转球就是恰当的一例，但是没有达到实际的应用，甚至连这种打算也没有。以后确实作了各种努力以期取得可实际应用的结果，但是直到十七世纪下半叶，随着丹尼斯·巴宾在德国以及托马斯·萨弗里在英国的研究，蒸汽机的历史才能说真正开始。最初的一些努力主要是企图制造从矿井内排水的蒸汽泵。在英国和北美广泛使用的这类发动机，是托马斯·纽可门的大气蒸汽机（1712）。在这种发动机中，直立汽缸中的活塞先被从缸底进入的蒸汽膨胀力向上推，然后，在蒸汽被喷入的冷水凝结后，活塞由于大气压强的作用重新降落。这种发动机当然要耗费大量的蒸汽，因为每次都需对汽缸进行冷却，然后才能重新获得需要的温度。1765年，詹姆士·瓦特对这种发动机作了相当大的改进。他把向汽缸喷射冷水简单地改为将汽缸连接到一个温度较低的空间，使排出的蒸汽在那里凝结。瓦特向汽缸两端交替地供给蒸汽，于是，不再利用大气压去推动活塞了。

瓦特和马修·博尔顿合作后，不仅进一步发展了蒸汽泵，而且也研制了旋转式蒸汽机。这将在第二十章中更详细地加以讨论。

## 其他一些问题

以上各节所论及的一些问题，可以表示出物理学史进展的大致轮廓。除此之外，在整个十七世纪和十八世纪，许多零散的现象引起了人们的注意。

（a）致冷剂：从事这方面实验的有波义耳和齐曼托学院。

（b）由上述科学家们和马略特所做的另外一些实验，涉及水结冰时体积增大和冰的比重问题。

（c）在1721年，华伦海特发现水的过冷现象。

（d）德国物理学家约翰·戈特洛布·莱登弗罗斯特（1715—1794）发现当水滴落在赤热金属板上时出现球形状态。

（e）由于对气象学的兴趣日益增长，导致制成各种类型的

温度计。在罗伯特·虎克（1665）的《显微术》一书中对其中之一进行了描述。以后阿蒙顿（1687）、约翰·海因里希·兰贝特（1772）和德吕克（1781）制造了其他各种温度计。其中最有名的是由奥拉斯·贝内迪克特·德索絮尔（1783）所制造的毛发温度计。

## 热传导

牛顿已经研究了热传导理论各方面的问题。他提出了后来以他的名字命名的一个热物体在冷介质中温度降低的定律。他为此定律而假设，在一小段时间间隔内，物体温度的下降与物体超过周围介质温度的程度成比例。后来杜隆和珀替通过实验测试发现，只有在温差很小时，这个假设才成立。到该世纪末，荷兰的内科医生简·英吉豪兹对各种物质热传导率的差异进行了实验研究。而德国学者兰贝特在其《高温测定法》（1779）中，提出了细金属杆中的热传导理论。十九世纪初，法国数学家让·巴普蒂斯特·约瑟夫·傅立叶在《关于热分析的理论》（1822）中，对热传导现象的研究比上述都详细。这本书中所用的数学方法，在整个数学和自然科学领域中都具有意义，以致该书的重要性远远超过它所涉及的热传导这一特定课题。傅立叶在书中发展了冠以他名字的级数，这个级数是三角函数的无穷级数型式的函数展开式。

在1847年，矿物学家亨利·于雷奥·德·塞纳蒙特用敷有火漆薄膜的晶片论证了各向异性晶体的导热率取决于热量流动的方向。

与热传导或热辐射问题相联，热的发射和吸收直到十九世纪才得到非常详尽的注意，这就是波义耳和本杰明·富兰克林对各种颜色物质的吸收本领的差异所作的实验，以及马略特所做的有关玻璃的吸收本领，以及利用一个双凸面的冰透镜可使会聚的太阳光线点燃火药的实验。除此之外，还有瑞典化学家卡尔·威

廉·舍勒和瑞士物理学家马克·奥古斯特·皮克泰用金属镜面所做的有关热线反射的实验。

热辐射理论的进一步发展，将在21章中讨论。在这里还要提到，热辐射和光辐射之间极为相似这一点，已被某些科学家所确认，但也被另一些科学家断然否定。

## 热力学的诞生

在十九世纪头十年，对热的本质尚有许多争论。但是热质说仍继续占优势，热质说是最符合量热学所观察到的事实的理论。它已被傅立叶用来作为他的热传导研究的基础，并且总的来说，这个理论使化学家们感到满意。当时，甚至表明热质说能做为一项新研究的基础，在某种意义上可以说，它开辟了热学理论史的一个新时代，正由于它引起那么多的数学理论，因而得到了热力学的名称。下文我们将论述法国军事工程师萨迪·卡诺（1824）所发表的《关于机车的燃料效率及其进一步发展的意见》一书（1824）。

卡诺的历史面貌蒙上一层迷雾，这主要有两个原因。首先，他的名字已和与随后发展的热力学理论有关的某些思想倾向永久地连结在一起，虽然这些倾向是他自己一些思想的合乎逻辑的发展结果，但还没有出现于他本人的著作中，因为这本书还是以热质说为基础的。1872年以后，他的热力学思想经历了一个相当大的变化，包括放弃热质说，这可从他死后留下的笔记中看得很明显。这当然对热力学的历史发展没有什么影响。但是，在一些有关卡诺的研究中，经常把这些“未出版的笔记”中的内容同时作为“意见”中的论述加以提及，这当然足以引起混乱。因此，必须仔细区分写《意见》的卡诺和《笔记》的作者；要经常记住，前一个卡诺并未阐明在热力学教科书中归功于他的全部内容。这里我们首先讨论第一个卡诺，但是为了表达他的思想，我们将利用实际上不可能据以区分两个卡诺的数学形式。是法国物理学家

埃米尔·克拉珀龙在1834年把卡诺的这些思想归结为数学形式的。

卡诺专心倾注于他的《意见》，目的是研究确定一台蒸汽机动力（现代术语是作功的能力）的最大效率的可能性，还为了研究除了用蒸汽提供热动力外，是否还有其他的工质，或者可能是更好的工质。因此，他关心热机的效率，也就是由发动机所完成的功与供给发动机的热量之比。他把这类热机的操作比拟为供给机械设备动力的瀑布，正如水从高处流向低处时可以供给动力一样，热也可以从锅炉的较高温度“落向”冷凝器的较低温度，从而提供动力。正象在第一种情况下水的损失一样，在第二种情况下，热也丢失了。人们在这里看到卡诺系统中热的物质概念的根本重要性；也理解了为什么他的思想不经修正就不可能被接受，而在后一阶段，这种概念不得不被扬弃。

然而，这与卡诺引入的另一种思想，即卡诺循环（图26）过程的思想不是一回事。他假定，如果可以按相反的顺序实现所包括的各项操作，那么这一理想地构想出的循环是可逆的。为此，循环过程必须由一系列平衡态所组成，并以一种无限缓慢的方式相继地发生。卡诺循环由定量气体的两个等温的（也就是在恒温下发生）和两个绝热的（也就是不包括和周围环境的热交换）体积变化过程组成，如克拉珀龙用图所示(图26)。在温度$T_1$下，从A到B发生等温膨胀，接着是绝热膨胀，使温度由$T_1$下降 到$T_2$，并到达工作状态 C。在此温度下，等温压缩使工作状态上升到 D，此后，绝热压缩使温度再升高到$T_1$，于是恢复到原来的工作状态。所完成的功W（用卡诺的术语：机车效率），用曲边四边形ABCD的面积表示。功是由热量Q的温度从$T_1$下降到$T_2$而产生的。因而发动机的效率μ可表示为

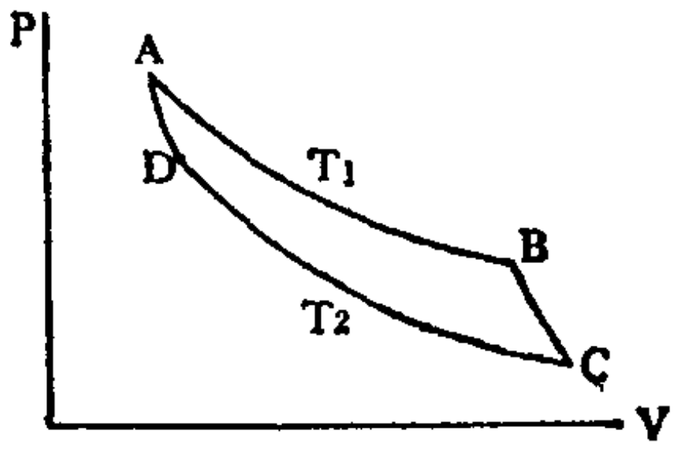



图26　卡诺的热循环

$$\mu=\frac{W}{Q}$$

然后卡诺说明如下：

（1）在所描述的过程中，M有一个极大值，因为没有温度的变化，也就没有体积的变化（如果温度不同的两个物体彼此相接触地放在一起，热可能直接传递，但这个过程不是这种情况）；

（2）这个极大值与所用的工质无关。事实上，如果用另外的工质可以完成功$W_1>W$，则可以通过逆向的第一个过程在消耗数量为W的功时，使热量Q恢复到温度$T_1$。回到温度$T_2$，该热量又可以再次完成功$W_1$，依此类推。这样，每次可得到功值$W_1-W$，而没有引入任何变化。无限期地重复这个过程，会得到一种永动机，这是不合理的，从而被卡诺所抛弃。因此，所用工作介质的性质不会影响从给定热量所得到的最大动力（也就是最大效率）。卡诺利用数学工具（对此详加论述超出本书范围）得出结论，当热量为Q，温度下降dT时，所完成的功dw由下式决定，即

$$dw=\frac{Q}{C}dT$$

式中C是初始温度的函数（卡诺函数）。

可以看出，上述考虑在什么程度上可与热力学原理相比拟。

## 气体定律

1802年，法国化学家约瑟夫-路易斯·盖-吕萨克继贝内迪克特·德·絮尔、约瑟夫·普利斯特列、德·莫尔维等人的研究之后，成功地把波义耳和马略特定律扩展为包括温度变化的定律。这个定律最初在十九世纪以下式表示

$$\frac{PV}{1+\alpha t}=C$$

（P＝压强，V＝体积，t＝摄氏温度，α＝气体膨胀系数）。如果

$\alpha$ 取作$\frac{1}{273}$，并且假定 t+273=T（绝对温度），那么，这个公式也可以表示为：

$$PV=RT$$

所求的$\alpha$值，是在法国物理学家维克多·勒尼奥（1810—1878）所进行的一系列高精度测量过程中确定的。他也确定了许多具有高精确度的其他物理常数。我们更要特别感谢他给予我们关于在—32℃到250℃温度范围内饱和水的蒸汽压和在各种温度下水的汽化热的知识。

十九世纪初，法国的物理学家们对于热量的精确测量给予极大的注意。由于这种测量对热学理论进一步发展极为重要，所以这里特别要提到气体定压比热（$C_P$）和定容比热（$C_V$）的测量，这种测量是拉瓦锡和拉普拉斯、尼古拉克莱芒和德索梅斯、弗·德拉罗什和贝拉尔以及勒尼奥等人进行的。

法国数学家泊松的工作对热学理论也是极为重要的。他的名字尤其是和气体绝热变化的定律联系在一起（顺便提及，这个定律已由拉普拉斯用公式表示），这个定律和等温状况下的波义耳-马略特定律PV=C相对应，该定律表述为：

$$PV^K=C$$

式中

$$k=\frac{C_P}{C_V}$$

## 热的机械论

大约在1840年前后，一些地方的科学界提出一个热的新概念。这个新的思想流派（当时，它忽视了热的精确本质问题）把热描述为当时仍通称为“力”以后则知道是“能”的一种形式。

这个理论从一开始就被称为“热的机械理论”。人们一想起这个名词便会觉得，对于把热作为一种能量形式的概念来说，它是一个奇特的称呼，因为这里所指的能量已被清晰地表述为非机械

性的，与通常公认的机械形式的位能和动能不同。

为新学说打下基础的基本思想，在一段短时期内，由丹麦科学家柯尔丁，法国人塞甘，德国人罗伯特·迈尔和英国人焦耳作了说明。我们打算仅限于介绍后两位，在上述诸人中，他们的论述是最精确和最详细的。

迈尔在推理的基础上发现他的理论。他从青年时就确信原子论者的格言是真理："无不生有，有不变无"。他绝不认为落地前一瞬间存在于落体内的动能（物体下落前以位能形式存在），会突然全部消失而达到静止状态。他确信，这种能量只能转换成另一种形式，实际上它转换成我们习惯上称之为热的这种形式。据他看来，这种能量的转换，会以各种不同方式发生，除了机械能以外，还存在各种其他形式的能量，包括磁能、电能和化学能。迈尔坚持他的主张，认为任何一种转换都不可能引起任何形式能量的损失。从而他提出了作为自然界一种至高无上的和普遍的法则，他称之为"能量原理"。这个原理是：宇宙（看作一个自制系统）中的总能量是守恒的。

接着，他在各种应用领域的许多陈述中，对这一原理详细加以说明。此外，他还提出了确定所谓热的机械当量，即转换成热的机械能与所产生的总热量的比的一种方法。为了确定此比值，他只选取在当时物理领域中众所周知的、能够适合于他的目的的事实——把可移动的活塞下面的1克气体加热升高 1℃，需要$C_p$卡的热量；而在固定活塞下面只需较少的热量Cv卡。所以差值（$C_p$—Cv）就是前一种情况下的机械功当量。其后，迈尔利用物理常数值取得了结果值，经过代数推导，它可被用来表示气体常数（也就是上面曾用过的，关于 1 克气体的常数R）。所以，很显然（$C_p$—Cv）卡相当于机械功的R个单位，因此，就得到了热的机械当量的表达式

$$\frac{R}{C_p - Cv}$$

焦耳从理论上确立的原理涉及宇宙中各种形式能量总和的守恒问题，他与他当时并不知道的迈尔的观点相一致，但他是从完全相反的角度来解决这个问题的。迈尔是用纯理论的方法计算出消耗一定的热量可以转化为多少机械功的数值；而焦耳则从实验上确立消耗一定量的机械功，会产生多少热量。他的一系列创造性地设计出来的各种不同的实验都做得很精确，从而得到和迈尔极为近似的热的机械当量值。后来，科学家们利用更精确的常数值并进行更精确的测量，成功地测定了更精确的热功当量值。目前认为最佳测定值是$4.2\times10^7$尔格/卡，或4.2焦耳/卡。迈尔在自己的国家是一个不受尊敬的预言家，而在别的国家中却完全不是这样。焦耳也只有在受到威廉·汤姆逊的支持之后，才得到应有的重视和评价。迈尔和焦耳的这些思想是在直到德国物理学家赫尔曼·冯·赫尔姆霍茨（1821—1894）在他的论文《关于力的守恒》中对能量原理进行了充分的讨论和说明后才确立的。在英国，新学说是通过约翰·丁铎尔使人们知晓的，他的通俗短文对传播科学思想贡献很大。在1861年，他最先使人们重视迈尔作为一个科学家的真正意义，我们应该把“能”这一术语归功于苏格兰工程师威廉·约翰·麦克奥恩·兰金（1820—1872）。

只是随着热的机械说的引入，对热与机械的和其他形式的能量关系做到了数学处理，才使热力学这门科学得以建立。依照热的机械说创始人的概念，科学的这个分支沿着纯唯象论的路线建立起来。他们小心地避开了各种热现象的起因和产生热现象的各种分子过程这两方面的问题。热力学之所以得以形成，主要归功于德国人鲁道夫·克劳修斯（1822—1888）和英国人威廉·汤姆逊（1824—1907），后者后来成为开尔文勋爵。严格说来，热力学第一定律就是应用热能转换成机械能以及相反过程的能量原理。德国化学家威尔海姆·奥斯特瓦尔德（1853—1932）以后把它描述为第一类永动机是不可能的原理。所谓第一类永动机就是一种事先不供给任意形式的能量而能产生能量的机器。这个原理绝不

包括全部自然过程：可以设想出很多人人都清楚是不可能发生的，然而并不违背能量原理的自然过程。例如欲使1千克水的温度下降1度，那么要消耗4.2K（千焦耳）的能量。

事实上，对这种不可能性原理的陈述，可由对卡诺循环较严密的考虑导出。按照热的新概念，温度$T_1$时接受的热量$Q_1$多于温度$T_2$时放出的热量$Q_2$，差值（$Q_1$—$Q_2$）被转化为功。结果热量损耗了，这和瀑布（瀑布的水没有消失）的倾泻相似。

藉助于波义耳-盖-吕萨克和泊松定律，克劳修斯得以证明，在卡诺循环中，下列关系能很好地成立（卡诺-克劳修斯定律）。

$$\frac{Q_1}{T_1}=\frac{Q_2}{T_2} \qquad (1)$$

效率的表示式现在变为

$$\mu=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}=\frac{T_1-T_2}{T_1}$$

从上式可以推断，在给定温度$T_1$时，所用的两个热源之间的温差越大，效率就越高。现在能再一次证明，在同样温度之间工作的卡诺循环，使用不同的工质，并不会提高$\mu$值。这项证明可以不再用卡诺所提供的方法（此法相当于确立它违背能量原理），但需用另一项“非相容原理”，这个原理可以用各种不同的方法加以阐述；事实上，它已成为著名的热力学第二定律。此定律被很简单地表述为如下两种形式：

（1）克劳修斯（1850）：热绝不能自发地从较冷的物体导向较热的物体。

（2）汤姆逊（1851）：不能藉助于非生物物质的作用，通过把物质的任何一部分冷却至低于周围物体最低温度的方法而得到机械功。后来这个定律被表述如下：要设计一个从单一热源吸取热量而使重物升高却不发生其他影响的循环工作机器是不可能的。

这样的一种机器和能量原理可以是完全一致的，但是热力学

第二定律否认它的可能性。由于这个原因奥斯特瓦尔德把这个原理叫做“第二类永动机不可能原理”。由于证明了第一类永动机的不可能性，排除了凭空产生能量的幻觉；而第二原理又使我们打消了从一种表面看起来是很丰富的，但不能实际利用的位能源获得能量的希望（例如从海水取热）。

以上对热力学科学进展的概述当然是不完全的。随着时间的推移，要想公正地处理一系列研究人员所做贡献之间的复杂关系，或对这些科学家中的每一位在自然科学发展中的贡献份额给予精确的确定，都变得越来越困难。在任何情况下，这样一个综合的评述，都需要比我们现在的处理用更多的篇幅。

现在再回到上面已摘要叙述过的问题。我们仍要对卡诺在《意见》出版以后所经历的理论变化进行些考察。我们从他“未出版的笔记”中知道他已采用热的动力学概念，并已持有由克劳修斯的解释而证实的他的“循环”观点。更进一步的表现是，他已经提出热的机械当量。实际上，这是最早问世的该当量的测定，但正如我们已见到的，它没有成为一项为后人因袭的结果。

我们再对首先由克劳修斯提出的熵的概念稍加考察，来结束热力学这一节。他提出了下面的定义：如果一个系统经过一个可逆的变化，在温度T吸收热量Q，则称该系统的熵增加Q/T。因而在卡诺循环中，最初有一个熵增量$Q_1/T_1$，接着有一个熵减量$Q_2/T_2$。因为这些量是相等的，所以熵仍然相同。事实上，这适用于一切可逆过程。在不可逆过程中，也就是在所有实际过程中，熵是增加的。就宇宙来说，除了包含在其中的总能量不变外，熵增加原理使克劳修斯把宇宙看作一个自给系统，他还提出把熵的恒增原理作为物理科学的一项基本原理。

熵的概念，通过开尔文勋爵和路德维希·玻尔兹曼的影响，出现了新的重要的思想倾向，这些思想倾向超出了本书范围。需注意关系式（1）被开尔文勋爵用来表达温度的定义，其中所用测温质的特性不再起作用。利用液体或气体类型的温度计所测得

的温度数值，就明显地不是这种情况。在新概念中，两个不同温度的比值等于在这两个温度间循环操作过程中相继吸收与放出的热量之比。

## 气体定律（2）

除了热力学的纯唯象研究以外，克劳修斯对于气体动力学的理论也有贡献。这个理论最先由丹尼尔·伯努利提出；但在1856年以前一直处于停顿状态，这一年奥古斯特·卡尔·克勒尼希使之复兴，且被苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦继承下来，他写了许多著作使这项理论日益引起人们更多的注意。根据他们的工作，荷兰物理学家范·德·瓦尔斯在题为《关于气态和液态的连续性》（1872）的论文中，以动力学研究为基础把波义耳-盖吕萨克气体定律扩大到新的范围，可以解释该定律不曾包括的并且首先由勒尼奥指出的那些现象。这个新定律的表达如下：

$$(P+\frac{a}{V^2})(V-b)=RT$$

式中P、V、R和T代表在原定律中相同的量，a和b是常数。在$a/v^2$这项中考虑了分子内部的吸引力，而b 则指分子的实际体积（丹尼尔·伯努利也曾想把这项考虑纳入他的理论）。这条新气体定律和由它所引出的推论对十九世纪物理学的另一领域，即气体的液化和低温的获得方面的研究产生了重要的影响。

## 低温

用致冷和压缩的办法来液化气体的企图可追溯到十八世纪。1787年马蒂努斯·范·马尔乌姆和阿·佩特斯·范·特鲁斯特维克液化氨气获得成功。十九世纪初，米哈依尔·法拉弟在这个领域中获得多种成果。他液化成功的气体有氯、硫化氢和砷化氢。但是一些最为常见的气体，象氢，氧和氮，单用压缩的办法使之液化的一切试验均未获得成功。由于这个原因，对后一类的气体

用“永久气体”的名称加以区分。

1867年在苏格兰物理学家托马斯·安德雷斯的领导下，推进了气体液化条件的临界的和实验的研究。他藉助于等温线证明二氧化碳存在着所谓临界温度。也就是说在临界温度以上，不论加多大的压力，也不能使气体液化。这就使人们推测，所谓永久气体是临界温度低于可用已知办法所获得的温度的气体。为了证明这个假设，物理学家们必须找到可能获得低温的方法。在以后的岁月里，发展了各种各样的方法。它们全都是建立在以下现象之一的基础之上：

（1）如果气体被用于对外作功，则气体的温度将下降。

（2）已经液化的气体的液相在迅速蒸发时产生冷却作用。

（3）如果在低于某一温度下对气体作高度压缩，则当该气体绝热膨胀时，产生冷却作用（焦尔-开尔文效应）。

由于研究工作者们单独地或综合地应用上述原理，他们终于成功地设计出把一切现有的气体冷却到低于它们临界温度的方法，随后就可以用压缩的方法液化这些气体。许多物理学家对此作出了贡献，我们只能提到其中几个人的名字以及他们取得主要成就的日期：

凯莱特和皮克特（1877），奥尔热夫斯基（1883），冯沃比莱夫斯基（1883），冯·林德（1895），杜瓦（1898），昂南斯（1908）。他们的共同努力对物理学的发展和现代致冷技术的出现都具有极端的重要性。其中在物理学的发展方面特别要提到的是，在相当低温的条件下金属中会出现超导现象（电阻减小到零）。

# 第十九章

# 声　学

## 音程的计算原则

在古希腊占据统治地位的音程计算原则支配着整个中世纪，一直到十七世纪。音乐是中世纪大学的四门学科之一，另外三个学科是算术、几何学和天文学。但是如果认为音乐这一名词的含意首先是音乐的实际练习和乐理的讲授，那就错了。音乐作为一门被讨论和研究的学科，具有明显的数学外观，甚至和比例学说原则时常完全相同。总之，音乐的主要课题是音程和音阶。

十六世纪对谐音音程的研究，使人们认识到对键盘乐器进行精确的调音是决不可能的。这一认识又引出了调节音律问题：要找到调节的规律，利用这种规律，使不可避免的杂音以最大可能掩饰过去。长时期来，流行着由德国风琴制造者阿诺尔特·施利克在1511年提出，并在1577年由西班牙音乐家弗朗西斯·萨利纳斯所改进的中音律，中音规律只是逐渐地被尚在应用的等程规律所代替。似乎远在1482年，西班牙人巴托洛·拉梅斯已经发明了中音规律，并且在十七世纪初得到西蒙·斯台文强有力的支持。在这种中音规律中，八度音程被分成12个等程半音，每一音程相对频率为$\sqrt[12]{2}$。除了八度音程这唯一的例子外，其余所有音程都是不规范

的。但在十八世纪前，它一直未被实际采用。约翰·赛巴斯蒂安·巴赫以他创作的四十八首前奏曲和赋格曲集（题名为《平均律钢琴曲集》），大大地促进了按等音程规律调音的乐器的发展。

十七世纪许多物理学家都从事于音程计算原则的研究，其中包括斯台文、笛卡儿、比克曼、麦山尼和惠更斯等。惠更斯的方案是把八度音程分成三十一个等音程，即通常所说的升半音，这样就使得每一个和谐的音程极其近似地包括全部半音数，和惠更斯同时代的音乐家们对这个方案给以新的意义。

## 作为物理学一个分支的声学

在上文所涉及的时期中，研究声学的物理学家们把这个学科的研究范围从算术方面扩展到物理学方面。伽利略、笛卡儿、麦山尼、虎克、伽桑迪和另一些人确实证明了一个律音的音调是由产生它的振动频率所决定的，声速与律音的音调及强度无关，这与古代的一般理论相矛盾。

人们也着手进行空气中声速的测量。麦山尼把声速值确定为1380呎/秒，伽桑迪确定为1473呎/秒，齐曼托学院确定为1111呎/秒。这里的英尺是指所谓的法尺，它的长度近似为0.325米。上述三个数值中的最后一个（相当于361米/秒）最接近真实的声速值。人们尚未注意到声速和声音所通过的气温有关这一事实，而风能影响声速的观点则被认为是荒谬的。

麦山尼察觉到在频率为每秒n周的弦的律音中，出现3n周/秒（第十二个）和5n周/秒（第十五个）的谐音，这个规则的有效性以后被汪利斯的两个学生威廉·诺布尔和托马斯·皮戈特所证实。

在麦山尼的《普通声学》（1636—1637）中，他提出弦的律音的频率和弦张力的平方根成正比，而和弦的长度及单位长度上的质量平方成反比的定律（这个定律仍以他的名字命名）。他还

测定了绝对频率。伽利略在他的《谈话》中也提到了振动定律。他认为绝对频率的测量是不可能的。在同一著作中，他描述了共鸣现象，同时尽力解释谐和音与不谐和音。奥托·冯·格里凯在他的《马德堡的新实验》（1672）中证明，声和光不同，它不能在真空中传播。

## 理论声学

关于声音在气体中传播的理论上的研究，是在牛顿的《原理》一书中出现的。他的结论是，声速和张力的平方根成正比，而和密度的平方根成反比。他由计算而得到的空气中的声速值为979呎/秒，与实验上确定的声速值1142呎/秒相去甚远。（这里呎/秒是指英国法定的标准呎，1142呎相当于1070法尺）。他对这一差异原因的说明没有获得成功。过了一世纪以后，由拉普拉斯和泊松作了正确的解释。

关于空气中所产生的声波波长的计算，牛顿利用了法国物理学家约瑟夫·索弗尔所设计的一种频率测定装置。后者在所考察期间对声学科学作出了重要贡献。他对弦的谐音作了研究，对共鸣进行了观察，说明了节拍现象，并且利用齿轮和原始形式的汽笛，进行了频率测量。在驻波理论中引用科学术语——波节和波腹应该归功于索弗尔，波节和波腹已是多种语言通用的术语了。英语中波节是node，而波腹是anti—node。

十八世纪，关于弦振动的数学处理引起了几个主要数学家的注意，其中包括达兰贝尔，丹尼尔·伯努利、欧拉、布鲁克·泰勒、拉格朗日和拉普拉斯。由于问题本身固有的数学上的困难，这一专门课题在本书中不适于进行讨论。但是可以提到，拉普拉斯在牛顿公式中引入了修正因子，以解释上述声速在理论和实验之间的差异。这样该公式即成为

$$v=\rho\sqrt{\frac{p}{d}k}$$

他也对这个以他的名字命名的因子作了说明：在振动传播过程中，由于快速交替的压缩和伸张的结果，气体的温度发生了变化，因而使声速增加了。拉普拉斯和泊松证明K是气体定压比热和定容比热之比。气体中的声速测量终于成为用实验方法测定上述比值的最好方法之一。

## 音乐声学

在所考察的时期内，意大利的小提琴手吉斯普·他耳提尼（1692—1770）发现所谓“第三音”，也就是现在通常所谈的“差音”，从而使声学中的音乐声学这一分支的知识丰富起来。也有许多讨论这个问题的作者，如伽利略曾提出其频率比值能以小整数表示的音调是怎样形成谐音音程的问题。欧拉大胆提出一种心理学上的说明，同时这一说明使他提出一个确定弦的不谐和音音阶的计算标准。达兰贝尔赞同由作曲家让—菲利普·拉莫所得出的结论，把他的说明建立在具有相同基音的各种谐音形成其频率比可用小整数表示的音程这一事实的基础上。他认为“这种音调与自然音调最为和谐”，因而一定悦耳。在十九世纪，赫尔姆霍茨发展了一种理论，认为两个音的和音可以归结为具有某些共同的谐音。

## 物理声学

十八世纪对声学学科的研究占统治地位的或是数学的或是音乐的方法，其后，由于十九世纪德国自然哲学家恩斯特·克拉尼进行弦、杆、薄膜和板的振动研究，人们看到了实验物理研究方法的复兴。克拉尼的研究成果包括在他的《声学》（1802）一书中。由于波节线在振动板上形成砂子图形，因而他更加闻名。克拉尼在杆的纵向振动方面的工作由奥古斯特·库特作了详细的说明，后者在1866年设计了一种在固体和气体中测定声速的方法，这种方法的基本点是——在初等科学教学中仍在使用——把石松子

粉末（一种非常轻的粉尘）涂在容器的里面，在空气中可见驻波的波节。这种粉末积聚于波节处，波节之间的距离为半波长。

在流体中能否出现纵波，是很久没有确定下来的问题，由于考虑到假定水是不可压缩的，因而怀疑这种可能性。自然哲学家认为，根据在齐曼托学院所进行的实验可以证明水是不可压缩的。然而，1822年奥斯特令人信服地证明水是可压缩的。

有关水中声波传播的研究工作也在同时着手进行。1827年，让-丹尼尔·柯莱顿和雅各布·卡尔弗朗兹·斯特姆确定其速度为1435米/秒，这是一次以在日内瓦湖中进行的测量为基础的计算。在法国，查理士·卡格尼阿尔格-德-拉-图尔和费利克斯·萨瓦尔特作了类似的工作。在1819年，前者把笛子作为一种理想、精确的频率测量仪器。萨瓦尔特利用汽笛和他自己设计的嵌齿轮改进了约瑟夫·索弗尔的研究工作。同时他测定了正常人耳的听觉阈，并且对乐器的构造和作用进行了详细的研究。在十九世纪初，恩斯特·韦伯和威尔海姆·韦伯兄弟对声学科学作出了重要贡献。对于干涉现象的发现和解释，我们应该感谢托马斯·扬。韦伯兄弟研究了一般的波动理论，这些成果均记载在《波动学》（1825）一书中。

1643年在声学史上揭开了全新的篇章，这是由于欧姆详细阐述了谐振动不能被人耳所分解，只能作为单音被感觉；而所有另外形式的空气振动则都能被分解成谐波分量，这些谐波的频率是连续的整数。这些谐波中的每一频率如果具有足够的强度，都能分别地被感觉出来。

我们曾提及傅里叶的数学定理具有物理学的和生理学的变换形式。耳朵接受空气振动完成傅里叶分析。这样欧姆阐明了一个乐器的律音是由一些“单”律音或“纯”律音组成的。随之而来的是与基音伴随发生的谐音现象的说明，这是自然哲学家长期以来就知道的一种现象。欧姆还设想，基因及其谐音的组合方式决定了音质，也就是说，只要确定存在着哪些谐音，它们的强度如

何，那么就能用物理术语描述声音。

赫尔姆霍茨在他的名著《作为音乐理论生理学基础的声音感觉教程》（1862）中完善了这一理论，并证明它的确切无疑。该书在1875年由亚历山大·埃利斯译成英语，书名为《音调的感觉》，并有附加的注释。赫尔姆霍茨在研究中利用球形谐振器测定一个复合声音中的单律音，他也成功地进行了具有一定音质的几个律音（特别是元音）的合成。他在这方面的研究成果开阔了现代生理声学，在这门学科中，听和说都用物理方法进行测试和说明。他也证明了他耳提尼所发现的“差音”现象是更普遍的混合律音现象的特例。

赫尔姆霍茨的研究工作形成了现代物理声学的基础。通过技术设备的完善，现代物理声学可能得到进一步的发展。在这方面我们要特别提到由美国物理学家戴顿·米勒所作的位移曲线的记录和分析。我们要感谢美国声学的各种重要成就。

1861年，菲利普·赖斯，一个德国的物理学家首次制成了能够传送语言的实用仪器。直到十五年后由美国人亚历山大·格雷厄姆·贝尔和伊莱沙·格雷同时改进，这种仪器在技术上开始实际使用。1878年，由于采用戴维·爱德华·休斯发明的碳精粉话筒，使这种电话再一次得到重大改进。

1878年，托马斯·阿尔瓦·爱迪生发明了留声机，而在1887年，埃米尔·柏林纳又制造了一个和它不相同的留声机。每个人从他自身的经验中都知道，从爱迪生时代以来，声音的记录和再现技术有何等巨大的进步。

礼堂和音乐厅的音质研究工作大约始于1900年，当时沃利斯·萨拜因对哈佛大学讲演厅的声音达不到标准这一问题进行了考察，这项研究成果导致他提出交混回响时间的概念，并研究了这个量对房间音质的效果。他也研究了各种物质的吸收特性，因而首创了音乐堂或演讲厅的科学结构。

# 第二十章

# 蒸汽机的成熟

蒸汽机、焦炭、铁和钢是促成工业革命技术加速发展的四项主要因素。有人认为工业革命在1750年左右已经开始，但直到1830年，它还没有真正蓬勃地展开。工业革命起源于英国，到十九世纪，这场运动陆续扩展到欧洲大陆和北美。

## 科学激励着工程师

在那“设想的时代”里，建立牛顿世界的数学力学图景并讨论自然界规律的科学家们，很少有助于工程师。然而，十八世纪是“理性的时代”，这时，这门新科学的一些原理都已经公式化，科学家们转向研究细节问题，其中许多直接有助于工程师。工程师们对于“进步”及“世界公民权利和义务”这类新思想的兴趣大概不如对于新的热学理论、应用力学和材料强度或进行计算用的新数学工具的兴趣大。一些老牌大学如牛津大学和剑桥大学，对这种合作的贡献很少。迈步向前的是一些新设立的大学，如爱丁堡大学和格拉斯哥大学，这些学校培养出象休谟、罗伯克、凯尔和布拉克等人物，他们促进了新技术的诞生。皇家学会以及一些新成立的中心，例如太阴学会和曼彻斯特哲学学会及欧洲大陆许多类似的学会，由于研究并讨论最新科学理论和技艺，从而对这种新技术作出很大贡献。在这方

面，贵族、银行家和商人注意倾听科学家、发明家和工程师的意见，并帮助他们实现许多由他们提出来的规划。这些贵族、银行家和商人们对科学研究、示范表演提供大量资财，并对实际解决紧迫问题者颁发奖金以刺激发明。他们拥有促进发展的资金，为此约翰逊博士① 曾惊呼："这是一个疯狂地追逐革新的年代。全世界所有商号必须按新的方式行事，人们必须重新考虑一切；梯布恩自己也因革新的浪潮而感到不安全！"一些新的机构，如国立工艺博物馆② 和英国皇家协会通过演讲和示范表演推广新的科学和技术，演讲的听众中外行人占绝大多数。

## 工程师和熟练工人

由桥梁道路学校开始培养出来的新的专业工程师是工兵及军事工程师的后裔。但是，新的技术还需有其他类型的工程师，为此目的建立了新的学校，如综合技术学校和矿业学校。英国政府不大关心新型熟练工匠的教育，他们都是在实践中得到训练的：例如一些著名的工场，其中有博尔顿和瓦特在苏霍、伯明翰设立的工场，或道伯森和巴罗、阿萨·李斯及理查德·罗伯茨所开设的工场。它们的成功不仅取决于良好的指导，而且也与适用的仪器和熟练工人有关。

十八世纪的科学家们已经制造出许多对工程师有重大价值的新型仪器。它们不再由从事研究工作的科学家自行制作，而是由卡塞尔、纽伦堡或伦敦以及诸如莱顿、巴黎和爱丁堡这样的大学城的专业仪器制造者从事生产。他们的仪器变得更加有效和精确，因为一些优质材料，如制造棱镜用的优质玻璃和更精密的金属加工方法当时均已可以运用。

熟练工人的造就则比较困难。博尔顿和瓦特这样老一辈的人

---

① 大概是指Samuel Johnson。——译者注

② 原文是法文，指巴黎的工艺博物馆。——译者注

不得不和锻工及木工等一起工作，他们必须对这些工匠重新进行教育，并培养出一批新型的工匠——“熟练工人”。早期的机械设计经常表明它是由属于行会系统最后时期的旧式工匠制造的。在十八世纪，新的实业家们在自己的机器工场内曾试用几种培训制度，直到十九世纪他们才最后解决教育问题，为新工业所需的工人创立了学校和课程，使他们能胜任有详细规定的发动机和机器零件的设计与制造工作。

对此项发展作出重大贡献的一个因素是应用力学及材料试验方法的兴起。由帕拉提渥、德伦、虎克、伯努利、欧拉、库伦和帕罗纳特等人表述的理论和定律可能还不够完备，但它们指出了在机器结构中十分重要的材料强度的确定方法，格拉弗萨特和范·莫西伯拉克在十八世纪初首先设计和演示了测量各种材料的拉伸、断裂和弯曲强度用的各种机器。这些仪器由高塞、郎德兰特等人逐步加以改造。梁的弹性性状、拱的强度和其他许多问题都取决于这些试验。几位科学家发展了供某些材料用的试验，例如木材用的（布丰），石料用的（高塞），金属用的（雷奥米尔）。这些知识对于来自机器工场的蒸汽机和其他机器的发展至关重要。

## 机器工场

领导这场工业革命的工程师们既要创造工具又要造就新的工人。瓦特本人是一个训练有素的仪表制造者，他曾在铸造车间和机器工场发明过几种新的工具和机器并培训工人。因此他的笔记本充满了有关机器的新思想。他发明过复印机。与他同时代的具有独创性的莫兹莱和勃拉姆也同样是多产的。约瑟夫·勃拉姆是现代抽水马桶（1778）和第一个成功的专利锁（1784）的发明者，赫布斯（1851）曾花了51个小时的劳动来打开这种锁，而在此之前还无人能用万能钥匙把它打开。

寻求适用劳动力的困难是下列事实造成的：新机器不再是由一个锻工匠制成的简单部件，而这样的机器系列是由一些标准零

件组成，这些零件在制造上要求有相当高的精确度。对蒸汽机零件必须作精确的加工，以防止蒸汽从相对滑动的金属表面之间漏逸；而当蒸汽压力逐步增大，使蒸汽机效率更高时，这一要求尤为突出。因此，新的工具和精细加工方法，例如车床和钻床、切割机和抛光机显得十分重要。

1797年亨利·莫兹莱发明了螺丝切削机床。车床原来是属于木工作坊的。甚至在十八世纪以前，车床也只用于车削象锡和铅这样的软金属。虽然达·芬奇已经设计了用几套可变齿轮调节速度的车床，但那时仍用踏板代替弓来带动车床。莫兹莱运用了类似的思想，并引入滑动刀架。布鲁内尔、罗伯茨、福克斯、惠特华斯等人完善了近代车床，它们可使加工对象作水平和垂直移动，可用丝杠调整，并在操作结束时自己停车。旧式车床先是用手操作，然后由蒸汽机带动，最后用电动机驱动。这时就可以大量生产螺钉、螺栓、螺母和其他标准件了，从而机器不再是分离的工作部件，它们是由大量生产的零件组装而成的。

十九世纪，机器工场的工具大有改进。皮带轮、轴和手柄都已制成。新式的六角或转塔车床具有可绕其轴回转的圆的或水平的转塔，转塔每侧孔内夹持着所需的切断或车平面的刀具。然后随意使这些刀具与被加工金属接触，这样在很短时间内就完成了六台分离的车床所完成的工作。1857年制造了可自动回转的转塔，最后哈特纳斯发明了平面六角车床，用水平切削盘代替转塔，这样使车床具有了较大的灵活性，并可作高速切削。这类车床包括钟表匠所使用的小型车床直至加工大型枪炮的车床。此项改进因本世纪初泰罗和惠特引入高速工具钢而告完成，它使机动车床成为大量生产机器零件所需的通用工具。

## 工厂和工业革命

上述情况使制造过程本身发生了巨大的变化。这时大多数商品不再在工匠的私人作坊内，而是在较大的工场内进行制造，这

类工场内的水轮或蒸汽机带动一根轴，一些小型机器借助齿轮或皮带从轴上获得动力，每台机器仅对金属或材料作部分加工。因此，制造过程分解成操作系列，每项操作由一台专用机器完成，而不是由谙熟全部操作的工匠手工完成。

近代工厂是缓慢兴起的。甚至在1800年，“工厂”一词仍指作坊、货栈或仓库；十八世纪人们经常提到“磨坊”，其中有许多磨坊的原动机仍是马拉磨或踏车。1844年的纺织工厂法规首次讲到“工厂”一词。

显然，新型工厂需要支付大量资金。连绵不断的局部战争造成中欧和意大利的贫困，所以工业革命不是从那些地方兴起，许多德国发明家离开自己的祖国到西欧去碰运气。法国对“制造业”国家的控制办法未获成功。法国政府没有在培养工程师的同时造就一个熟练工人阶级，拿破仑的“法国工业自立”政策随着他下台后重建的海外贸易而归于失败。低地国家和斯堪的那维亚都不具有工业革命所必需的资本和原料。只有十八世纪的英国才得天独厚具备这些综合条件：繁荣的海外贸易；充分发展的金融系统；煤和铁矿等原材料；自由贸易和关心工业的中产阶级，他们愿意承担采用新技术的风险，并从农民队伍和爱尔兰及苏格兰移民中吸收新的熟练工人。

因此，工业革命的一些最初征兆出现在英国而不是法国，但法国很快地仿照行事。十九世纪中叶，德国开始加入竞争行列，而美国则在本世纪初才成为竞争的劲敌。

## 杠杆式发动机

新工业的原动机是蒸汽机。由于纽可门和瓦特的努力，把原始的抽水机改造成原动机。托马斯·纽可门（1663—1729）和约翰·凯利建成一种用100℃蒸汽冷凝推动汽缸内活塞的机器（1705）。活塞与杠杆的一端相连接，而杠杆的另一端则紧固于泵杆或其他机器。这种发动机主要用于矿井排水。约翰·史密通

（1724—1792）研究了纽可门机并加以改进，他的方法是进行测量和计算，改造它的锅炉和阀门，并把它变成1800年前最为普遍的蒸汽机。

詹姆士·瓦特（1736—1819）是作为一个仪表制造工人而得到训练的，他听过约翰·罗伯逊和约瑟夫·布拉克在爱丁堡的讲演，当时那儿正详尽阐述新的热学理论并讨论温度和热量的测量方法以及蒸发和冷凝现象。他发现在纽可门机的汽缸中由于喷射蒸汽加热再用冷水喷射使蒸汽冷凝，从而浪费了大量的热。因此他设计了一种在分离的冷凝器内产生冷凝作用的发动机。当蒸汽向上推动活塞时，阀门在确定的瞬间开启，从而使冷凝器与汽缸连通（1763）。

瓦特试图在苏格兰的约翰·罗伯克开设的卡隆铁厂制造他的发动机，但那儿缺乏制造零件的熟练工人。于是他向南方迁移，并开始在马瑟·博尔顿的工厂工作，后者确立了罗伯克在瓦特专利（1774）中的份额。在勃拉德利附近约翰·威尔金森的铸造厂里，可以对汽缸作精密镗孔，这样瓦特在1781年制成了他的第一台大型蒸汽机。瓦特机的功率输出是纽可门机的四倍。它立即在盐水厂、啤酒厂和蒸馏厂中被普遍用于抽水。博尔顿和默多克协助宣传和推广使用瓦特的蒸汽机。

## 双向旋转发动机

但是瓦特并不满足于上述成果。1781年的专利使蒸汽机成为通用的有效的原动机。藉助于一组齿轮的“行星运动”，杠杆另一臂的拉杆把杠杆的上下运动转变成旋转运动，齿轮组使紧固于杠杆末端的拉杆和轴相连接，在轴上装有主动齿轮和皮带，它们带动从此轴上获得能量的机器。

1782年的另一项专利使他的早期蒸汽机成为双向发动机，在这种发动机中，蒸汽交替进入活塞的一侧。只有当博尔顿和瓦特已经解决了铸造和加工较大且精密的汽缸这一困难任务时，才能

取得这项成就。瓦特还不得不借助他所推广的三杆系统（1784）（他称之为“平行运动”）改进杠杆和活塞杆的连接关系。他还采用一种调节器，调节器在准确的时刻切断对汽缸供汽，而在行程止歇点使蒸汽膨胀，以更加充分地运用蒸汽的能量。

1788年他设计了离心调速器，它根据负荷调节供汽，使每分钟的活塞行程数保持恒定。六年后，他在自己的发动机上装以蒸汽表或蒸汽指示器，这是一套与主汽缸相连通的小型汽缸和活塞。指示器的小活塞与描笔相连接，后者可在纸片上指示出小活塞的运动状况，从而可对蒸汽机的运转提供适当的控制。威廉·默多克（1754—1839）因发明了滑阀和机器零件铸铁表面之间密封糊状物的制备方法，因而对蒸汽机的成功作出很大贡献，因为当时尚无密封垫可供使用。

到1800年，约有500台博尔顿和瓦特的蒸汽机投入使用，其中有160台用于把水抽至水轮上，再推动其他机器运转。其余一些蒸汽机主要是推动其他机器运转的旋转式发动机，有二十四台为高炉鼓风，它们的平均功率为15—16马力。

## 新式高压蒸汽机

1800—1850年间，蒸汽机发展成为主要的原动机。这是由于当时建成了采用高压高温蒸汽的蒸汽机，它们每磅所具有的能量比早期瓦特蒸汽机所采用的100℃蒸汽要大得多。这只有在蒸汽机零件的制造趋于完善，并且这些零件的设计更为合理和加工及装配更为精确的条件下才得以实现。

雅伯兹·卡特·霍恩布罗尔建成第一台“复式蒸汽机”，在这种蒸汽机中，由第一个汽缸释放出来的蒸汽在第二个汽缸中作进一步的膨胀。这些复式蒸汽机不需要瓦特的冷凝器；但在使用高压蒸汽之前，它们尚无真正竞争能力。理查德·特列维雪克和奥立弗·伊万斯是高压蒸汽机的先驱，它意味着蒸汽机每单位重量能提供较大的马力。它还意味着发动机的重量较轻，从而可用

于陆上和水路运输。

在热学理论尚未充分阐明，热力学尚未建立，气体理论尚未研究，以及对高温下金属和材料的强度缺乏充分研究的情况下，不可能合理地设计蒸汽机。另一个重要的问题是产生高压蒸汽的锅炉的结构。瓦特时代所采用的古代蜂箱式锅炉不能承受这样的压力。特列维雪克创造了科尔尼锅炉（1812），这是一种用内部管道加热的卧式圆筒，管道使燃烧气体经锅炉流入烟道，提高了锅炉的燃料利用率。威廉·费阿柏恩设计的兰开夏锅炉（1844）有两套管道，成为科尔尼锅炉的剧烈竞争者。较好的烧煤炉篦也被设计出来，例如约翰·包德谟的“移动式炉篦”（1841）。由于应用格林的废气预热器（1845）中的烟气加热锅炉内的冷水，节约了许多燃料。在十九世纪，建成了多管式锅炉，它们大多数都是立式锅炉，其中最著名的是伯可克和威尔考克斯管式锅炉（1876）。

有助于改进高压蒸汽机设计的其它一些因素是：亨利·华兴顿发明的直接动作式蒸汽泵（1841），蒸汽卷扬机（1830）和詹姆士·纳斯姆士的蒸汽锤（1839）。在此期间卡特拉特（1797）和巴通（1797）改善了金属的密封，使之保证紧密的连接并防止严重泄漏。

这样，蒸汽压力从1810年的3.5大气压增至1830年的约5—6个大气压，但这些早期的高压蒸汽机仍是杠杆式的。以后出现了许多效率高得多的旋转式蒸汽机，它们的活塞杆通过曲柄与主动轮相连接。虽然早期的美国考利斯蒸汽机（1849）仍然采用杠杆式设计，但约翰·曼那特（1845）和E·考浦（1857）引入了先进的旋转方式，它们一直被保留下来。这种类型的三缸发动机是布拉德·霍德（1871）和凯克（1874）引入的，成为蒸汽船十分通用的发动机（1881）。

在1850年前，蒸汽机的平均输出功率约为40马力，当时风车和水轮平均输出功率为15马力，相比之下已有明显增加。此外，

蒸汽机的安设地点不受当地是否有水力或风力可供经常使用的限制。蒸汽机是一种可以移动的原动机，它可安装在任何需要的地方，例如可以安装在位于煤田和铁矿附近的炼铁厂内。1700年英国共消耗煤3,000,000吨，其中大多数作居民取暖之用。到1800年，由于使用蒸汽机，此项数字增加一倍；到1850年，由于蒸汽机以及冶金业中使用焦炭，此数字增至60,000,000吨。

## 从木炭到焦炭

欧洲冶金业的兴起逐渐造成矿区附近木材的严重短缺，迫使工业家把冶炼厂迁移到森林资源仍然丰富且有水力可供利用的山区。但这只是一种暂时的摆脱方法，因为木材价格在两百年内上升80%，并且工业分散造成严重的运输困难，因为道路系统不能满足日益繁忙的运输。

许多世纪以来，冶金学家们企图利用“海运煤”代替昂贵的木炭进行冶炼操作，但煤的挥发性成分对产品产生不良影响。煤的产量在许多欧洲国家仍持续上升。英国1550年煤产量约为50,000吨，由于煤广泛用于家庭取暖和玻璃、肥皂、锡及明矾的生产，到1700年其产量增至近3,000,000吨。

大多数煤矿都是水平巷道系统，矿井深200英尺。主要的问题是通风和排水。矿内煤的运输逐步采用小马牵拉木撬或在木轨上移动的小车，然后用马拉起重机把其提升至矿井以上，最后运至河岸或海岸。安全措施如井壁或衬板，在十八世纪已广泛使用。纽可门蒸汽机曾解决了许多排水问题。但还存在煤气爆炸的危险，直至汉·戴维发明了矿工灯（1815），才解决了这一问题。

到1750年，英国的大多数煤田都已开采，产量持续上升；在十八世纪期间，煤产量增加一倍。廉价的海上运输使伦敦和南部地区用煤很方便。由于木材资源日益缺少，木炭价格越来越高，许多冶金家曾经尝试除去煤中的挥发性成分，这样就可获得木炭

的代用品。但都特·多特莱（1621）和其他人未能如愿以偿——他们的产品仍发出硫磺气味，并且不能往熔炉内供送使焦炭充分燃烧的足量空气。达比一家三代人找到了解决的方法，它的基础是适当选择焦化煤的品种。不使用烟煤；深层的无烟煤比较适于生产冶金用的焦炭，这种煤必须坚硬且无硬渣，否则会阻碍熔炉内的空气循环。小亚伯拉罕·达比于1717年前后发现这一原理，而焦炭生产的详细过程是后来由其儿子制订的。

焦炭是在蜂房形砖石窑内由煤炼成，而不是采用旧式的成堆炼焦法。这种方法获得很大成功，因为在几十年内，冶金业普遍使用焦炭，1780年前后推广至鲁尔，约在1796年普及至萨尔地区。旧式堆烧法于十九世纪初就因其产生恶臭而遭到禁止。人们逐渐进一步了解了煤的焦化过程；并且在认识到炼焦时产生的煤气和焦油对于化学工业具有重大价值时，开始以蒸馏器和箱式炼焦炉代替蜂房式窑。阿波特、考帕、胡萨纳、奥托和考伯尔等人先后创造了先进的箱式炼焦炉，它们可以有效地回收煤气和焦油。

关于向高炉内供送足以使焦炭燃烧的适量空气问题，是由约翰·史密通（1760）解决的，他利用一套水轮驱动两个活塞，活塞在铸铁汽缸内移动并对空气加以压缩。约翰·罗伯克在他的卡隆铁厂运用此项原理取得很大成功。本世纪末，蒸汽驱动的压缩机开始对大多数高炉鼓风。

## 新炼铁技术

由下列事实可清晰地看出上述诸项发现所产生的效果：1720年钢铁产量为20,000吨，1788年增至70,000吨，1806年增至250,000吨。新燃料的首要效果是使焦炭冶金业不再依赖木材资源；熔炼厂又从分布着森林的山区迁回铁和煤矿产地。其次，使工业得以较为集中。旧式炼铁工业实际上是一系列小型行会。先由高炉把铁矿石和木炭炼成生铁，再把生铁交小型炼铁厂生产成

铸铁或铸件，或由锻工把生铁制成熟铁条。然后把这些熟铁条送至槽轧厂加工，熟铁条在那儿加热并通过有槽的辊子拉制成棒料。熔炉厂、锻造厂和槽轧厂往往相距很远，生铁、铁板和铁条的运输很不经济。最后还有一些小型工厂生产由熟铁制成的锅、泵和发动机用的汽缸、某些类型的火炮和由熟铁制成的钉、镐、锹、锁、螺栓、铁丝、工具等日用品。

还有其他一些因素促进了不同的金属加工行业的有效集中。雷奥米尔在1722年的手册中曾试图解释各种冶金过程的原理，并用生产过程中所取试样的物理试验确立质量检查。他猜想熟铁转变为钢是纯熟铁吸收碳的过程。实际上，伯森、伯格曼和克罗特证实，钢的含碳量为0.3—0.8%，铸铁约为1.0—3.5%。对各种类型铁的性能和成分的知识的日益增长促进了炼铁生产的合理化。

在炼铁业中采用新型熔炉是所采用的最重要步骤之一。其火焰由顶部反射至金属的反射炉，可用于精炼其他金属，例如银的精炼。亨利·考特和彼得·奥涅斯独立地提出用这类熔炉把生铁和焦炭转变为熟铁的思想（1783）。这种生铁搅炼法就是用铁棒或“拨火棍”搅动反射炉内的物质，直至它烧掉多余的碳和其他杂质，完全转变成粘滞的熟铁块。然后把熟铁块置于有槽的轧辊间加以滚压，轧辊把浮渣挤压出去，从而生产出标准的坚韧的熟铁，它们具有良好的防腐蚀性能。

滚轧方法是从十六世纪起缓慢发展起来的，斯惠德·克利斯多弗·波尔姆（1661—1751）把滚轧机转变成一种机械，只要能够得到足够的水力，就可以把铁轧成实际需要的不同截面。当蒸汽机可以提供较强大的能量时，滚轧机有了进一步的发展，到十九世纪中叶，它可将红热的钢块或铁块轧成不同截面的板料和棒料。

考特的发明也有助于炼钢方法的改变，当时炼钢仍采用坩埚熔炼或古代的渗碳方法（在炉内用几天时间对熟铁和木炭加热）。但冶炼结果很不确定，瑞典的“粗钢”不得不重新锻制成剪钢，

此项工作主要是在纽卡斯特尔进行的。

舍菲尔德的钟表匠班杰明·亨茨曼（1704—1776）曾试图在坩埚内重新熔炼渗碳钢，再在反射炉内加热。虽然他首次生产的钢质量很差，但他掌握了控制加热方法，发现了坩埚和铸模的合适材料，因而有可能生产质量较高的熔融钢水。这样，舍菲尔德钢的生产超过了纽卡斯特尔而跃居首位。

以后又发现了其他的铁矿石，例如苏格兰的“菱铁矿”，在1830—1840年间，当传统的铁矿品种供应短缺时，这些新发现的矿石开始具有重要意义。随着高炉变得越来越大、越高。又出现了解决获得足量供气的发明。格拉斯哥的詹姆士·比奥森·内森提出预热鼓风的光辉思想（1829）。考潘（1860）把这些装置转变成新型耐火砖塔，它们成对工作，其中之一利用废气的燃烧预热，另一个则把此热量传递给鼓风装置。这样就使新型高炉可能获得很高的温度。

## 新的金属

十八世纪对于新矿物的研究及化学分析导致发现许多新的金属品种。虽然当时并未立即加以应用，但到了十九世纪，它们就变得十分重要了。首先是在哥伦比亚（1735）和乌拉尔山区（1820）发现了铂。武拉斯顿对铂以及亦由他发现的铑和钯进行了研究，发现了把其制成坩埚和容器以供化学实验应用的秘密（1805）。在他去世（1828）后，皇家学会向科学界揭开了此秘密。

锌曾被阿格里高拉当作一种奇特的金属。十八世纪，它已经在哈兹山区和比利时用闭式熔炉进行生产并加以提纯。锌被用于复盖铁板表面，操作方法是把铁板浸入熔融的锌浴内。萨尔弗斯特和赫伯森（1805）发现了生产这种镀锌铁板的合适方法，它立即成为盖屋顶工人和白铁匠的习用材料。在同一时期被发现和提取的其他金属还有镍（1751）、铬（1797）、锰（1774）、钼（1782）、

钒（1830）和钛（1831），但在十九世纪末之前，还没有发现它们与钢制成合金使工具和机器零件具有特殊性能的重要性。至于镍，只有当法拉第发现用电解方法在另一金属表面镀以薄的镍层（1843），并在新苏格兰找到丰富的镍矿时（1876），才显示其重要性。

## 新型纺织工厂

纺织品生产是古代农业经济的一个分支。十八世纪初，虽然从海外输入蚕丝、亚麻和棉花等原料，它仍保持古代中世纪行会的许多特征。蒸汽机的使用和纺织生产过程的机械化使棉布商和亚麻布商成为工业巨头，他们在财政上得到银行家的支持，后者在此之前已经是贸易的组织者。

水轮机和蒸汽机促使生产过程集中，并使分散的梳理、纺纱、织布、漂洗、漂白、染色和修整作坊的旧式结构解体。有几项发明支持了这种生产过程的集中。兰开夏的制箔工人约翰·凯伊于1733年发明飞梭，它用纺锤穿纬线，并可使织布工织出宽度加倍的织物。此项发明遭到强烈反抗，只是到1760年左右才确立其地位。大约与此同时，鲍尔企图通过在锭子纺纱前让梳理过的棉条在两组以不同速度旋转的滚子间延伸的方法，使纺纱工作机械化。这种方法由理查德·阿克莱爵士于1769年加以完善后变得十分重要，因为用这种方法可以生产出很结实的棉纱，从而不必再象从前那样在棉纤维中使用亚麻经纱。这时就可以制成全棉织物，并且棉织业的纺纱和织布工序可以集中在一个工厂内。

詹姆士·哈格里夫斯的珍妮纺纱机（1764）可由一个工人在一台纺纱机中使用8个、以后为16个纱锭纺纱。纱锭数目后来增至80个，到1788年有不少于20,000台珍妮机生产着不太结实的棉纱。1775年阿克莱制成较为完善的“水力纺纱机”，用它可以生产较为理想的棉经纱。1775年阿克莱发现了藉助滚筒旋转而进行的机械化梳棉方法，这样使他得以在一个工厂内联合进行梳棉和纺

纱。大约与此同时，萨缪尔·克伦普敦制成“骡机”，综合体现了“珍妮机”和“水力纺纱机”的原理。1790年左右，这种纺纱机开始用蒸汽机带动。这类机械使得棉纱生产的不同阶段可以集中在一个工厂内。1782年曼彻斯特有两家这样的工厂，而到1802年已有五十二家！第一台动力织机由卡特莱特建于1784年，以后经雷德克利夫、赫罗克斯、约翰逊和罗伯特等人加以改进。这些动力织机的生产率为手工织机的十倍，1824年英国已拥有2400台这类织机。大约在1830年，已经建立了包括整个纺纱和织布工序的新型纺织厂。

其他一些发明找到了结实的棉纱和织物的生产方法。十七世纪的旧式织带机由凯伊和弗卡森在1765年使之自动化。李在1589年发明的旧式针织机由许多发明者加以改进，最后一个改进者是杰代狄阿克·斯特鲁特，他引入与原来的一套织针成直角的第二套织针（1758），这样就可以生产弹性大得多的针织品。埃利·惠特纳的轧棉机（1793）使原棉质量有了决定性意义的改进，它使棉籽与棉纤维分离，以后经霍尔姆斯加以改进（1796）。第二项基础性的发明是埃利阿斯·赫维的双线连锁缝纫机。

织物的修整工序由其他一些发明者使之机械化并加以改进。托马斯·贝尔（1783）采用大型旋转刻纹滚筒代替笨重的木板以生产印花布。漂白原来是采用阳光下曝晒的方法，以后转变为用稀硫酸化学操作（休尔姆，1756），不久以后就为贝尔托莱用氯气和碱制成的漂白液（1789）和坦内特用氯气和消石灰制成的漂白粉（1799）所取代。马奎尔和贝尔托莱由于阐明染色的化学过程（1791）并发现媒染剂和空气的作用实质而奠定了近代染色技术的基础。

## 陶器及玻璃

一些新的发明也使旧日的制陶手艺发生了变化，它们原先大多是在小型作坊内进行的，产品由走遍国内的巡回“背箱者”予

以传播。十八世纪，人们对日本和中国陶器及瓷器的巨大兴趣促使许多人去探索这类优质陶瓷的制造过程。十八世纪下半叶，开始采用“高温测定珠”或小型粘土“塞氏”测温熔锥对炉温进行较好的控制。由于在粘土内掺入少量耐火砖粉末，阿斯特布利已经成功地制成十分坚硬的陶器。惠奇渥特在他的布尔斯莱姆工厂生产这类器皿（1759），该厂不仅应用蒸汽机驱动车床，而且以劳动力的精细分工和对工人福利的关心而驰名。

冯·肖哈森已于1687年用高岭土制成真正的瓷器。1705年起，由他的继承者包特格在柏林普鲁士正建造的工厂内进行此项产品的制造。著名的梅森瓷器首次在1710年的莱比锡商品展览会上展出，1717年在维也纳建立了一家新型瓷器厂。

在波希米亚、西里西亚、苏林吉亚、法国和英国，有许多繁荣的玻璃制造中心。这一时期最重要的发现是玻璃的浇注。奈翁的发现（1665）由路易·路卡斯(1688)加以改进，这时玻璃制造者能够制出窗户和镜子用的大块玻璃。在本世纪一些美国的发明者创造自动化的玻璃吹制和浇注方法之前，它是玻璃制造中最重要的一个步骤。1899和1904年间，托莱多的利贝和奥万斯研制了他们的第一台自动制瓶机，但直到1920年，还未达到现代化的形式。考尔柏在1900至1912年间研制了生产连续玻璃板的机器；在同一时期，还建造了电灯泡、管子、玻璃棒的自动生产机器。

十八世纪的玻璃浇注方法导致出现优质光学玻璃，此项光学工业的基础是由彼埃尔·路易斯·格内特建立的（1774—1802）。由于浇注方法较为完善，并且使用例如路布兰碱这样较纯的材料，使之能生产出化学性质均一的玻璃，它们基本上没有杂质。切斯特·霍尔（1733）和约翰·道朗（1758）已掌握如何用燧石玻璃和冕牌玻璃棱镜组合的方法校正色差。肯克尔改进了奈利制造各种不同玻璃的技术，但只是在法拉第和其他英国科学家对玻璃化学作进一步研究后，这些经验的方法才趋于完善。卡尔·蔡司及其友人恩斯特·阿贝对优质玻璃的制造作了进一步的基础性

研究，由于他们的工作，使耶拿光学玻璃制造厂驰名世界。以后，只有美国的例如考宁玻璃制造厂这样的中心才能对蔡司和阿贝的早期研究有所改进。

阿森纳西阿斯·柯奇（1601—1680）曾述及优质玻璃棱镜。在他之后，惠更斯（1659）改进了把图片投影至玻璃板再射向屏幕的技艺，从而制造了幻灯。这时也可以把影象记录于为此目的而特殊制备的玻璃板上。向现代照相术迈出第一步的是塞尼菲尔德平版印刷术的发现（1796）。以后让·涅普斯试图把照相机的影象固定于平版印刷石版上，他的企图未获成功，但最终把影象形成于独特的印刷板上。1839年达格尔完成了一种在铜版上产生银质影象的方法。1841年福克斯·泰尔包特引入光力摄影法，他采用了纸质底片。以后阿诺尔德·肖贝发明了硝基赛璐璐制造方法，斯柯特·阿奇将其用于“湿胶棉方法”(1851)，其中采用涂有敏化的经碘处理的硝基赛璐璐溶液的玻璃板。以后塞斯和博尔顿制成覆盖于玻璃板上的溴化银乳胶，即“干板”方法。马道克斯制得优质溴化银明胶（1871），华尔克发明了“胶卷”。最后伊斯特曼制成生产长卷照相纸的机器（1885），1888年首批胶片和携带式胶卷照相机投入市场。

# 第二十一章

# 光学的进一步发展

## 十八世纪的光学

十八世纪初，光学的研究情况可概述如下：

人类对几何光学的认识，已足够使他们懂得如何操作当时已广泛使用的折射望远镜、反射望远镜和显微镜之类的光学仪器。由球面像差而引起的图象失真得到了承认，而且旨在寻找校正图象失真的种种努力也获得了成功。我们感谢牛顿使我们认识了色散现象、折射率和颜色之间的联系及白光构成理论。这一理论使我们对使用透镜时产生的色差有了更深刻的了解。但是，由于牛顿对各种物体色散率的错误看法，而认为色差是不可避免的。

关于光的本性，当时有两种完全对立的理论：牛顿的微粒说（它过去曾经被称为而且现在仍被称为发射理论）和惠更斯的波动说。这个对立使得光是一种物质还是一种现象这个老问题又重新提了出来。每一理论都是以有关某一物质的折射率与光在该物质中的传播速度之间的关系的特定假设来描述的。现在我们把它们称作笛卡儿理论($n_{1,2}=\frac{V_2}{V_1}$)和费尔玛理论($n_{1,2}=\frac{V_1}{V_2}$)。

惠更斯的波动说对双折射现象作了充分的讨

论。当时把衍射现象称做弯曲，对干涉和偏振现象也这样认识，并企图在微粒说中为这种看法寻找解释；很显然，这是找不到的。但总的说来，对这些问题的兴趣，远不如对光的直线传播、反射和折射的兴趣浓。

纵观十八世纪及十九世纪头十年中光学的发展，我们发现，牛顿理论占统治地位。牛顿的观点已被自然哲学界一致接受，不同的看法只是偶而出现而已。查阅一下十八世纪和很多十九世纪的物理书，我们就会相信这一点。看一下当时第一流的著作，即皮特勒斯·莫西伯拉克的《物理学原理》和威廉·格雷夫森特的《基础物理数学验证》（两人均为荷兰第一流物理学家），很少找到他们伟大的同胞惠更斯理论的痕迹。相反，他们引证了牛顿理论，似乎牛顿理论确实是毋需置疑的。在同意牛顿理论的前提下，未作进一步的探讨，就认为对光来说，存在一种具有较大引力作用的、密度很大的介质。牛顿理论的巨大成功并不奇怪。由于万有引力理论而树立起来的权威肯定对接受他在光学方面的思想起了作用。在笛卡儿和原子论者的影响下，微粒说在当时占了上风。与光的传播、反射和折射现象相关而发展起来的微粒理论，生动而貌似有理，被认为是可信的；并且把与这个理论相矛盾的一些难以解释的现象隐藏起来。

另外，一开始就存在对这些理论的批评。莱布尼茨不反对存在光粒子的说法，但拒绝这些粒子受到远处作用力的假设，而这是牛顿一直坚持的。莱布尼茨认为，这个假设与力学性质相抵触，而他认为这力学性质对自然科学是很重要的。可是在1682年，他又站到了牛顿一边，接受了笛卡儿关于介质的折射率与该介质中的光速之间关系的理论。这是他作了与费尔玛的最小时间原理相类似的最小原理的假设而得出的结论。根据他的假设，通过的路程与遇到的阻力的乘积之和一定是最小的。这说明速率一定与阻力成比例，即与介质的密度成比例。莫泊丢在用最小作用原理处理折射问题时，于1744年使用了相同的论据。牛顿光学理

论的一个使人信服的反对者是伟大的瑞士数学家利昂纳德·欧拉，他在1746年至1752年间的一系列论文捍卫了光的振动理论。根据光的振动理论，光颜色的不同是因为波长不同，但几乎无人支持他。1756年，俄国物理学家米克黑尔·瓦西利维奇·罗蒙诺索夫在他的一个发言中支持了惠更斯所详细阐述的波动学说。但是，对光的波动学说作有效捍卫以反对牛顿的相反观点还需要很长时间。与其光学理论相比，欧拉对牛顿的散射和平均折射因物质而异的信条进行的批评，取得了较大的成功。这导致他在原则上认识到用各种类型的玻璃进行组合来制造消色差透镜的可能性。

1729年，英国业余光学家切斯特·摩尔·赫尔用一个冕牌玻璃① 凸透镜和一个火石玻璃的结合凹透镜的结合成功地实现了这一想法。这种可能性于1755年又一次被瑞典的物理学家塞缪尔·克林根斯蒂尔纳所证实。经过很长时间的试验，光学家约翰·道朗于1758年成功地制造出了这样的透镜，从而使消色差透镜第一次得到了实际的应用。他与儿子彼得合作，继续利用他的发现赚钱。后来，彼得的女婿杰西·拉姆斯登积极地参加了这项商业事务。

消色差透镜迎来了实用光学发展的新时代。仪器制造者们又可以满怀信心地去从事改进折射望远镜的工作了。同时，这一发现也为显微镜的改进提供了可能性。

在十八世纪，被称为光度学的光学分支，通过对光源强度和表面照度的研究得到了发展。这一分支的诞生，应归功于法国物理学家皮埃尔·博格，他在《论发光强度》（1729年）一文中对这个新领域作了全面概括，并给出了精细的测量结果（这方面他仅在若尔日-路易·勒克拉克·德布丰之后）。博格成功地确定了太阳和满月的亮度比（他确定的亮度比为300,000），测量了光滑面和漫反射面的反射光百分比。

---

① 即不含铅的上等厚玻璃。——译者注

到1760年，通过德国数学家约翰·海因里希·兰贝特的努力，光度学已经成为光学的一个完全成熟的分支。他发现了表面光照度的基本方程式，当表面与点光源的距离为 r，光源强度为 I，照射到该表面的光与法线间的夹角为$\alpha$时，照度E为：

$$E=\rho\frac{I\cos\alpha}{r^2}。$$

众所周知的简单光度计也由厄尔·朗福德和罗伯特·威尔赫姆·本生制造出来。1889年，更加精密的仪器已由奥托·卢默和尤金·布罗德汉在市场上出售。

## 光学理论的更新

在十八世纪末和十九世纪初，光学理论中出现了一种新的提法，它来自多才多艺的英国医生托马斯·扬。他在1800年发表的题为《声学和光学的大纲与实验》的论文中以及以后的一些文章中，提出了光是由一种难以捉摸且充满整个空间的叫做“以太”的流体中的自传播弹性振动所组成。而这些弹性振动又由发光物体所激发。这样，就使惠更斯的波动说变成了一种振动理论。

扬认为，色觉取决于以太的振动频率。鉴于以太极其稀薄，他认为光振动为纵波振动。但是，1808年艾蒂安-路易·马吕斯发现偏振以后，他不得不承认光波实际上是横波的理论，尽管从物理学的观点来看这个事实似乎是荒谬的。扬的观点遇到了强烈的反对，特别是英国政治家布鲁厄姆勋爵的反对。因为扬的解释总的说来不很清楚，而且他的数学计算理解起来也很困难，所以他的理论没有能获得积极的承认。1802年，在一次关于厚度连续变化的薄膜颜色（与牛顿环相同的现象）的讨论中，扬提出了振动理论的基本原理：“从任何地方来的两束相同的光，从不同路径到达眼睛，不管是从同一方向还是近于从同一方向，如果路径的差是某一长度的整数倍时，则光的强度达到最大；而干涉部分为居间态时，光的强度最小；这个长度因光的颜色而异。”这个观

点——在某些情况下光可以互相削弱——毫无疑问是与牛顿的学说完全对立的。扬在1807年写的《自然哲学讲义》中介绍了现在仍用他的名字命名的双缝实验。在这个实验中，点光源的光通过两个相邻的很窄的平行光缝，这两个光缝犹如两个不同但可干涉的光源。当两束光相遇时，就在屏幕上出现一系列黑白干涉条纹。扬还成功地测量了红光和紫光的波长，其值为0.7μ和0.42μ。扬取得了很多研究成果，其中包括人眼的构造和功能。例如，他证明了眼的调节机能依赖于晶状体形状的变化。他还创立了三色理论（各种颜色均由红、绿和蓝组成）。

扬未能取得波动说的决定性胜利，这一胜利是在1815年和1824年之间由法国工程师奥古斯丁-让·菲涅耳取得的。菲涅耳与绝大多数继续坚持牛顿理论的同行科学家相反，他通过极其巧妙的实验和同样巧妙的理论推导，证明了被扬修正过的惠更斯理论的正确性，驳斥了牛顿理论。

菲涅耳借用了惠更斯关于每一个遇到平衡扰动的以太粒子本身将成为沿各方向作用的新扰动源的原理。与惠更斯一样，他认为原因不是间隔时间不规则的扰动，而是连续的规则振动。因此，他并不满足于确定基波表面的包迹，而是继续考虑各种组合振动并应用了干涉原理。这样，他成功地证明了光实际上是直线传播的。乍一看，这个性质似乎与波动观念相互矛盾，而且这一点从一开始就被用来作为反对波动说的一个明显且起决定性作用的论据，它甚至阻碍了牛顿承认这个理论。此时，这个反对意见被征服了。

同一思路使菲涅耳对格里马第和牛顿所描述的衍射现象作出一种说明解释，并通过自己的实验作了补充。在这些实验中，其中有一个仍以其名字命名，此实验使用了两块黑玻璃平面镜，其夹角近似为180°。而另一个实验使用了双棱镜。两实验的目的都是想从单个光源得到两个分开的相干光源。后来，菲涅耳把主要精力放在对光的偏振现象的研究上。关于偏振现象，正如后来所

测定的那样，在惠更斯和牛顿的实验中已经看出一些迹象，但使其为大家所普遍承认，还是马吕斯工作的结果。他发现，小于某一定角度的反射光不能从任一方向通过双反射晶体。他测定出这个角度的大小与材料种类有关。因为已经通过双折射晶体的光正好表现出这种性质，所以可假设，这种具有特殊性质的光可用一种完全不同的方法，即通过反射获得。

马吕斯是牛顿的支持者，他企图用粒子说来解释这个现象。为此，他不得不作这样的假设：光粒子有点儿不对称，即存在极性。这就产生了“偏振”的概念。后来，菲涅耳用波动说成功地解释了光的这个性质。和扬一样，他不得不假设光振动是横向的。这是一个极其大胆的假设，因为根据弹性理论，横向振动是不可能在以太这种稀薄的介质中产生的。在这一点上，甚至菲涅耳的支持者和斗士多米尼克-费兰索瓦·阿拉贡也不能再跟他走了，因此他的观点也就遭到了更为强烈的反对。

菲涅耳所进行的第三方面的重要研究是关于晶体中的双折射。他解决了如何区分单轴晶体和双轴晶体的问题，从而为晶体光学奠定了基础。最后，我们应该提一下他关于下列问题的试验和理论：由阿拉贡发现的色偏振，偏振面的旋转，光在各向同性透明体中经反射和折射所产生的变化，以及如何表示光在某种相对于观察者来说具有一定速度的介质中传播时相对于观察者的光速变化的所谓传输系数。

在十九世纪初，其他法国光学家还有：

让-巴普蒂斯特·毕奥，他是一个不寻常的科学家，多才多艺，富有成果。他在许多科学领域内进行工作。尽管菲涅耳已经取得了成果，但毕奥继续支持牛顿的光学理论。然而，为了考虑所有新发现的现象，他不得不一次又一次地以附加的假设补充牛顿的理论。这本身说明了牛顿理论是站不住脚的。

奥古斯丁-路易·柯西是一个对十九世纪的数学发展作出了重大贡献（尤其在使数学更加严密方面）的伟大数学家。他通过

自己的光学研究完善了波动说。他的成果之一就是建立了介质中光速的数学表达式，式中介质的折射率为波长的函数。

在光学这个领域进行研究工作的科学家中，大卫·布儒斯特爵士的名字必须提一提。他的研究涉及很多方面，其中包括偏振、双折射和吸收光谱。他也是荧光的发现者之一。另外，他对牛顿的生活和工作也作了全面的研究。

在研究偏振和双折射现象的科学家中，还有德国科学家费兰茨·恩斯特·诺伊曼。他的同胞约瑟夫·冯·弗琅和费对光学也作出了有意义的贡献。他利用一块在色散实验中用过的棱镜、一平行光管和一架望远镜，在1814年和1817年之间，成功地测定了由威廉·希德·武拉斯顿于1802年发现的太阳光谱中514条暗线的确切位置。这些在光谱中起着标志作用的暗线，从那时就用弗琅和费来命名。他还研究了平行光的衍射，制成了第一个衍射光栅（他用这种衍射光栅测定各种波长），改进了折射率的测量方法，并且在精确计算的基础上，制成了一些非常好的光学仪器。

尽管如此，在代表对立的两派光学理论的笛卡儿和费尔玛的主张之间，仍然没有可供作出最后抉择的判决性实验。为此，需要一种光速的陆地测量法。这种方法是于1849年第一次由法国科学家阿蒙-希波里特-路易·斐索提出来的，他使用了一个转动的齿轮。但是这个实验要求有约五英里的距离，所以测量仅能在空气中而不能在其他介质中进行。1850年，让-巴帕梯斯特-里昂·傅科的实验，使用的是一块转动的平面镜，故使测量可在室内进行。这样就可能进行使光线通过除空气以外的其他介质的实验，以便测定到底是光在空气中的速度大于在水中的速度（如费尔玛理论中所述），还是空气中的速度小于水中的速度（根据牛顿理论）。傅科立即发现，前者是对的，这证明了牛顿理论是站不住脚的。用傅科方法测定空气中的光速，后来重复过许多次。其中以西蒙·纽康姆布和艾伯特·迈克尔逊于1880年和1882年间在俄亥俄的克利夫兰所做的测量（数值为299860±60公里／秒）

最为人所共知。

1851年，斐索应用傅科的方法检验了菲涅耳关于运动介质中光速的理论。他证实，当光线（其速率＝c）通过一折射率为n的介质、相对于观察者的运动速度为v时，其速率为：

$$c_1 = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$$

式中因子（$1 - \frac{1}{n^2}$）叫做菲涅耳传输系数。

以后，迈克耳逊和彼·塞曼重复了这些试验。这时，波动说取代了微粒说。尽管取得了这样的成功，波动说仍然存在由于以太振动是横向的这个基本假设而遇到的重大理论缺陷。这个缺陷是如何解决的，将在第二十三章中介绍。

## 光谱分析

对光谱的研究，是十九世纪光学对整个物理学发展具有重要意义的一个方面。

这些研究可以追溯到1752年苏格兰人托马斯·梅尔维尔所做的一次观测。十九世纪初，几个英国物理学家——武拉斯顿、约翰·赫谢尔爵士和威廉·塔尔博特——指出，某一发光物体与光谱中某一谱线对应。他们同时还更进一步提出，可根据光谱线的出现来确定物质的存在。

但在当时，这个想法还不能得到普遍的理解。塔尔博特认为，D线既表示钠盐的特性，又表示硫的特性。我们知道，太阳光谱中的暗线在十九世纪初就已发现，并且已对吸收光谱进行了研究。但是，在这整个领域中所做的研究的真正意义，只是在两位德国专家基尔霍夫和罗·威·本生的协力下才第一次表现出来。1859年在《论弗琅和费谱线》一文中，他们首次宣布借助物质发出的光，可把光谱分析变为对物质研究的有力手段。他们认为光谱清楚地反映了化学元素的特性，而且通过光谱分析很快就发现

了当时还不知道的元素铷和铯。他们的成就为光谱学的长期研究开辟了道路。这方面的发展情况，我们不能在此介绍了。

在十九世纪的后半期，大部分时间都用来研究不同元素谱线的波长测量。在此，我们应特别提一下瑞典科学家安德斯·约纳斯·埃斯特朗、美国人亨利·阿·罗兰以及德国人赫曼·卡尔·沃格耳、亨利希·凯泽尔和卡尔·龙格。在这些相似的测量的基础上，瑞士人约翰·雅各·巴尔默才可能于1884年对一系列谱线的波长建立第一个普遍适用的数学公式，从而开辟了现在证明对于现代原子理论极为重要的一个研究领域。

很自然，光谱技术逐渐得到改进，其中最为重要的是弗琅和费的光栅得到了完善。第一次对光栅进行改进的是德国光学家弗列德里希·阿道夫·诺贝特，因为他的试验盘能确定显微镜的放大率，他的名字至今仍为人们所熟知。但最大的改进是美国人路易斯·莫里斯·卢瑟福和亨利·阿·罗兰作出的。他们的仪器对波长的测量极为精确，从而使迈克耳逊能将红色镉谱线的波长作为长度的标准单位。结果，埃斯特朗所使用的、并以他名字命名的$10^{-8}$厘米单位①于1907年被重新规定为该波长的1/163,384,696。

对辐射和吸收关系的理论研究，使基尔霍夫能对太阳光谱中的弗琅和费谱线作出解释，并且说明其在对太阳进行实际的物理研究中的意义。威廉·汤姆生主张这个理论应该归功于英国光学家乔治·斯托克斯。汤姆生说，斯托克斯于1849年已将此理论向他透露过。但斯托克斯本人反对分享基尔霍夫的成果。

辐射和吸收理论引导基尔霍夫建立了以他名字命名的辐射定律：对于每一波长，辐射体的辐射能E与吸收率A之比仅取决于波长和绝对温度T，而与物体的性质无关。这可用下式表示：

$$\frac{E}{A}=e$$

① $10^{-8}$厘米 = 1 Å。——译者注

式中e是A＝1时（也就是一个物体吸收所有投射到它上面的光时）的物体辐射能。这样的绝对黑体也同样是一个完全的辐射体，因为E具有最大值。

这种所谓黑体辐射在物理学的进一步发展中起了很重要的作用。一开始就碰到了这样的问题：辐射密度与T之间究竟存在什么样的关系？根据比埃尔-路易·杜隆、阿历克赛-特里斯·裴替特和约翰·丁铎尔所搜集的数据，约瑟夫·斯忒藩于1879年建立了这样的定律，即辐射密度与T的四次方成正比。路德维希·玻尔兹曼经过热力学计算，于1884年进一步证实了这一理论。因此，把这个定律叫做斯忒藩—玻尔兹曼定律。

通过对各种波长辐射能分布的研究，使威尔赫姆·维恩于1893年建立了位移定律，现在叫做维恩位移定律，即具有最大辐射能的波长与绝对温度成反比，因此它随着温度的升高而移向短波。最后，科学家们都致力于找到一个能表示黑体各波长辐射能分布的公式。可惜篇幅不允许我们在此对约翰·威廉·斯特鲁特（瑞利勋爵）、詹姆斯·秦斯爵士及麦克斯·普朗克后来在这方面所做的工作作详细介绍。普朗克定律是量子理论发展的起点。

另一个对天文学来说极有价值的理论是奥地利数学家克里斯琴·多普勒于1842年表述而由斐索定形的多普勒—斐索原理。原理表明，运动物体所发射的波，根据其运动是趋近还是离开观察者而必定产生频率的增高或降低。多普勒将此原理应用于双星。荷兰物理学家和气象学家克里斯托弗·布依斯·巴罗特于1845年对声源模拟进行了实验验证。

## 光学仪器

光学仪器在十九世纪得到了极大的发展。我们只能介绍两个方面，即显微术和摄影术。在第二十二章里，还要介绍一些有关反射望远镜和折射望远镜的情况。

在十八世纪，显微镜是一种使用非常普遍而又贵重的仪器。

使用显微镜的，主要是那些对用显微镜来观察生物和矿物感兴趣的业余爱好者。这就很自然地导致显微镜制造技术的改进，进步虽然不大，但在理论上加深了对仪器构造和工作原理的理解。在十九世纪的头十年中，显微技术得到了稳步的发展。在这一方面，意大利天文学家齐奥凡尼·巴·亚米齐的工作具有重大的意义。亚米齐成功地制造出了复合透镜，使各种不同透镜产生的误差大体上互相得到补偿。他又把实物浸在液体中，从而改善了影象。这个方法的可能性及其价值早在十七世纪就已被虎克所注意。

1874年，赫尔曼·冯·赫尔姆霍茨和恩斯特·阿贝两人对显微镜成像作了理论上的研究。他们研究了分辨率和口径之间的关系。他们的研究均以光的波动说为基础，从不同的途径，确定了两点间(可分别观测到)可能存在的最小距离的下限，该下限为：

$$\frac{\lambda}{2A}$$

式中λ为所用光的波长，A为透镜口径的数值（$A=n\sin\frac{\alpha}{2}$，n为浸没液体的折射率，α为口径角）。这清楚说明，光的波动本性决定了分辨率的增大有一绝对限度。当光波从物体周围通过时，自然不存在观测的问题。

还有一些其他可采取的观测方法，其中之一基本上是由显微术的先驱者虎克、惠更斯和范·李文虎克发现的。当时他们在报告中说，如果使他们的小手动显微镜稍离开光源一点儿，能看见非常微小的物体，这些微小物体如同很暗的背景上闪光的亮点。从这里，我们找到了现代暗场照视法的核心，它使我们能够分辨出直接观察不到的微小物体（但不是它们的形状）的存在。后来，显微镜的各部分（如透镜、照明、聚焦、载物台等）不断地得到发展。所以到了该世纪末，显微镜已经达到高度完善的程度。

我们还必须提一下偏光显微镜。偏光显微镜于1834年由塔尔

博特首次使用，它对矿物学具有重大意义。1833年由威廉·尼科尔制作的棱镜（叫做“尼科尔”棱镜）.对偏光显微镜以及偏振光的一般研究起着重要的作用。

摄影术也是十九世纪许多最重要的发明之一，不论从社会的角度还是从科学的角度看都是这样。我们通常将这一发明归功于约瑟夫·尼塞福尔·涅普斯。一些特别注意实用摄影影象的化学复印的人，则把摄影术归功于路易-雅各-芒代·达格尔，摄影术的最早形式——达格尔法[①]，就是用他的名字命名的。

正如所有其他半物理半技术的发明一样，照相机的历史是非常复杂的。光学在其发展中起着很重要的作用。与光学透镜有关的精密技术，在摄影术和显微术中已经以同样的速度得到发展。在理论研究中，恩斯特·阿贝、L·P·塞德尔和约瑟夫·佩茨伐尔的名字；在实践中，雅各·L·V·谢瓦利埃、C·A·斯坦海尔、约翰·A·布拉希尔和卡尔·蔡斯的名字是必须提及的。在摄影术中，化学方面取得了显著进步。1872年，溴化银精制胶干板取代了湿胶棉板。

要想简单地处理摄影术在这么多方面所取得的进展是不可能的。在这一章中，我们只能涉及摄影术在光谱学和天文学的发展中所起的非常重要的作用。

## 不可见光

在研究太阳光谱中不同成分的热效应过程中，威廉·赫谢尔于1800年发现，红光段的热效应比蓝光段强，而人类肉眼所看不到的红光以外的光，热效应最强。这样他便成了红外线的发现者。后来，德国物理学家约翰·威尔赫姆·里特（1776年—1810年）对此作了特别研究。但是这一发现丝毫也不意味着准备立即普遍承认所谓辐射热和可见光只是同一现象的不同形式。一个非

---

① 即银板照相法。——译者注

常强有力的反对者就是约翰·莱斯利——他用一面抛光另一面是黑色的盛有温水的方形容器所做的实验，对于了解辐射和吸收之间的关系作出了贡献。

意大利物理学家麦色多尼渥·梅伦尼在其实验中使用了热电堆，取得了明显进步。他用实验证明了红外线在折射中具有与可见光一样的相应差别。因此，他将1850年所写关于这方面内容的论文题目取作《火色》。梅伦尼一直研究固体和液体是否传热的问题，而英国物理学家丁铎尔（1820—1893）则用各种气体和蒸气进行类似的实验。

要在此全面介绍十九世纪许多国家的科学家在红外线辐射方面所做的大量工作是不可能的。因此，我们只能满足于简单地说，他们成功地证明，从物理学的角度看，红外线与可见光的不同之处仅在于红外线波长更长一些而已。在这一方面，约翰·威廉·德雷珀于1847年所发现的一个规律应特别提一下。他确定所有固体当加热至525°C时开始发红光，当低于此温度时发红外光，继续加热，波长较短的光所占的比例越来越大，直到发出白光而形成完整的光谱为止。

同时还必须提及1880年塞缪尔·比尔邦·兰格莱发明热辐射测量计以后，红外线观测技术的重要改进。在这个领域也使用克鲁克斯于1873年制做的辐射计或各种经过改进的辐射计。

对于紫外线的介绍，比红外线辐射甚至要更简单一些。紫外线是可见光谱中紫光的继续。紫外线是约·威·里特于1801年发现的。1727年，德国医生约翰·亨利希·舒尔兹观察到氯化银在光照下发黑。1777年，卡尔·威尔赫姆·舍勒证明，光谱中的蓝光和紫光具有最强的作用。里特当时指出，紫外不可见光也会产生相似的黑化作用。许多研究工作者提出了紫外线对磷光物质也起作用的推测。后来证明，这种推测是对的。

紫外线很快就成了物理学研究的共同课题。最后的研究结果同样表明，紫外线与可见光相似，只是波长较短。早先反对把两

种辐射都看作光的意见从此逐渐销声匿迹了。

## 发光

发光现象——可称为冷光发射，与热光（如白炽光）相反——由艾尔哈德·威德曼(1888年)分为六类：光致发光、热致发光、场致发光、结晶发光、摩擦发光和化学发光。荧光（放射过程中发出的光）和磷光（放射后所发出的光）均为第一类发光的特殊形式。所有生物发光都属于第六类，即最后一类发光。

几个世纪以来，许多后来确能证实的发光现象的研究报告已广为流传。有关这方面的最早的一本书，可能是瑞士动物学家康拉德·格斯纳所写的《论稀罕而珍贵的发光草》(1555年)。这本书讨论了会发光的动物、植物和石头，潮湿地区周围的易燃烧气体、北极光、桅顶的电光等等。

在十七世纪，其兴趣被这一研究课题所吸引的人当中，有阿塔纳修斯·柯奇，他著有《光和影的伟大艺术》(1646年，1671年)。1603年，波伦那的旺桑佐·卡斯卡里奥罗在将一种矿物煅烧成石灰石时，矿物变成了重晶石。在此过程中，他首次发现了磷光。后来，肯尼格·勃兰特和约翰·肯克尔在制取元素磷的过程中又一次发现磷光。1676年，约翰·西基斯蒙特·埃尔斯霍尔茨发现了热致发光（萤石和缓加热）。

讨论生物发光的一本重要专著是丹麦科学家托马斯·巴塞林的《论动物光》（1647年）。

十八世纪初，自法国天文学家让·皮卡德于1675年在暗处晃动气压计时观察到气压计中水银所发出的光以后，就开始了对场致发光的研究。虎克的继承人、英国皇家学会实验负责人、物理学家弗朗西斯·豪克斯比特别致力于这一现象的研究。

1703年，法国科学院在波尔多组织的一次有关这方面的比赛，把物理学家让-雅各·多尔图斯也吸引进来。后来，查理-弗朗索瓦·德西斯泰内·迪费和冶金兼昆虫学家勒奈-安都昂·费

尔肖·德·雷蒙也作出了不少贡献。

很自然，对发光的迹象在十八世纪所举行的多次关于燃烧的讨论中占有很重要的地位。到该世纪末，杰·吉·皮克尔和舍恩瓦尔德发现了结晶发光的迹象（在某些溶液结晶过程中发光）。十九世纪，在发光这一领域内所得到的经验是非常丰富的，以致只能在综合性的著作中进行总结。自十九世纪初以来，在发光方面的发现很多，我们只能提一下狄·布儒斯特（1833年发现叶绿素，1838年发现萤石），约·赫谢尔（1845年发现奎宁硫酸盐）和G·G·斯托克斯，他在关于发光现象的理论述评中引进了“荧光”这个术语。1867年，埃德蒙·贝克勒尔出版了一本有关发光的综合性著作，极有价值。

正如后来所知道的那样，十九世纪的发光理论远远落后于不断增长的大量的经验。二十世纪初，原子理论首先对发光问题的深入理解作出了贡献。此后，发光在照明和通信方面的巨大技术意义方显示出来。

# 第二十二章

# 十七世纪的天文学以及其后至十九世纪中叶的天文学史

## 十七世纪的观测

我们在第九章谈到了一门新的天文学的兴起，此后，这个课题虽然不时地再度出现于我们的阐述之中，但常常是在讲到物理学的力学和光学的应用时才联系到它，它本身并没有被作为专题来介绍。现在，我们必须研究它本身的发展了，为此，我们追溯到发明望远镜从而在天文观察中开创了新的可能性的时代。

正如所料，伽利略并不是把望远镜用于观察天体并发现新事物的唯一的人。1614年，安斯巴希的西蒙·马里乌斯（梅耶）在其著作《木星世界》中宣称：在1609年他就已经看到了木星的卫星，而且紧随伽利略之后，他对木星的卫星做了系统的观测。为此，伽利略指责他是剽窃。然而，业已证明这项指控是完全没有根据的。没有一点理由可以怀疑马里乌斯工作的独立性。他的有关运行周期的资料以及其它细节看来比伽利略本人的更为可靠。发现太阳黑子的情况与此多少有些相似。诚然，人们以前用肉眼偶然地看到过这些黑子，但是此时人们

能够通过望远镜在阳光相当弱的情况下——例如透过清晨的薄雾，对太阳黑子进行系统的观察了。约翰尼斯·法布里齐乌斯于1610年12月在埃姆登看到了太阳黑子，克里斯托弗·沙伊纳神父于1611年3月在因戈尔施塔特看到了太阳黑子。沙伊纳在奥格斯堡公布了他写给议员马库斯·韦尔塞尔的关于他发现太阳黑子的三封信件。对此，伽利略1612年5月宣称：他在1610年8月中旬以前已在帕多瓦看到了太阳黑子，以后在佛罗仑萨又反复地观察过它们。与沙伊纳的一场激烈争论（这场争论至少对历史是有利的）随之而起，对立的双方都将自己的观测与研究汇编成单独的著作——伽利略汇编成《关于太阳黑子的书信》(1613年)，而沙伊纳汇编成《红熊》(1630年)。对太阳黑子运动的观察，证实了开普勒在行星运动动力学理论中提出的太阳绕轴自转的假设。

那时所用的望远镜仍是所谓的荷兰望远镜，这种望远镜具有一个负目镜。正如我们已知道的那样，开普勒在他的《光学》（1611年）一文中提出了具有一个正目镜的望远镜理论。这种望远镜优于荷兰型望远镜之处，在于它具有较大的视场，从那以后，完全取代了较老式的望远镜。到底天文望远镜是如何发展的，以及谁是首先制造天文望远镜的就不得而知了。

这种新型的望远镜在克·惠更斯的一生中占有重要的地位，他从23岁起直至高龄，一直在理论上以及实践中从事这种望远镜的研究。他对成象及其固有的缺陷作了彻底的研究。他还同他的哥哥康斯坦丁一道练习磨透镜的技艺。他用第一架自制的望远镜——其焦距为14英尺——于1655年发现了土星的一颗卫星（后来人们称其为泰坦），并且确定其运转周期为16天零4小时。1656年，他还成功地解决了土星奇怪的附属物之谜。自伽利略以来，此谜一直使天文学家们感到困惑。他发现土星实际上是被一个光环围绕着的。在他的著作《土星体系》(1659年)一文中，阐明了观察者可能看到光环的不同方法。该文还说明了许多其它已被观察到的光环上的现象。由于他的望远镜给出的仍然是相当模糊的象，

因此对光环的发现须给予高度的评价。在以后的岁月中，惠更斯制造了各种其它望远镜，焦距不断地增大，直到120英尺或更大。这样做的目的是为了尽可能地减少球面像差。意大利的透镜磨制者朱塞佩·坎帕尼亦步其后尘，采取同样的方法。

天文望远镜的引用开辟了许多新观测的可能性。当时，在被观测天体成实象处的物镜焦平面上安装金属窄条（惠更斯，1659年）或两平行线（其中之一可通过螺丝进行调节）(艾德里安·奥佐特，1667年)，而金属条或平行线通过目镜可与天体的象同时被观察到。这样，天文学家们就能测量天空中短小的距离（如一行星的视直径）。这就意味着发明了测微计。后来知道，英国天文学家威廉·盖斯科因远在1640年就已用过这种方法。通过让一星体的象与固定在物镜焦点处两交叉标线的交点重合的办法，天文学家们能够比以前用肉眼和借助自然景物更为准确地将望远镜对准一星体。认为这种新仪器确有优点的主张，首先遭到其中包括但泽天文学家约翰尼斯·赫维尔，即赫维尔克或赫维留在内的一些人的质疑。赫维留在1679年同艾德蒙·哈雷的比赛中，确实证明了用他的仪器和肉眼能将位置测量得与哈雷用带有望远镜的六分仪进行测量一样精确。不论怎样说，赫维留确有敏锐非凡的眼力，而且是位经验丰富的观察者。虽然如此，未来是属于望远镜的，它与人眼不同，它可以改进。

法国和英国政府都建立了天文台，此时，天文学史便开始了一个新阶段。巴黎天文台是路易十四降旨建立的，于1672年竣工，而格林威治的皇家天文台是奉查理二世之御旨于1675年建立的。意大利天文学家基奥伐尼·多曼尼哥·卡西尼，被任命为巴黎天文台台长，于1671年走马上任。格林威治天文台台长是约翰·弗拉姆斯蒂德牧师，他享有皇家天文学家的头衔，而这一头衔至今仍然沿用。建立这两个研究机构的主要目的是为了航海的需要。自然哲学家们完全相信：为了精确地确定航行中船的位置，确切地知道天体的位置是一必不可少的条件，而且精确地知道天

体的位置与经度的确定有很大的关系。不论日常生活的要求有多么大的可能去促进天文学的发展，但是在天文学史上还没有一个时期的发展完全是由日常生活的要求来决定的。为知识而求知的不可压制的热望逐渐稳固地占据了支配地位，这就鼓舞了天文学的真正内行。而这种强烈的愿望经常能由各地的统治者或富豪提供帮助得到满足。从一开始，前述英法两国的天文台以及与他们同时存在的其他天文台（如1656年在哥本哈根建立的圆塔天文台）或不久后新增加的天文台（1700年在柏林，1725年在圣彼得堡）所做的天文工作，远非仅与航海有关。在巴黎，人们做了一些重要的观测工作，其中特别要指出的是卡西尼，他是专门从事行星观测的（例如，他发现了四颗新的土星卫星以及用他的名字命名的土星暗环，该暗环位于惠更斯亮环内），还有让·皮卡德，他是将望远镜与他的测量结合起来使用的。在格林威治，约·弗拉姆斯蒂德在开始十分困难的条件下（在1689年以前，他连一个用以确定绝对星位的大型墙式四分仪都没有），完成了大量的相当精确的观测工作——比以往的观测都精确。他从事这种观测工作一直到1719年逝世为止。许多天文观测方法的改进都应直接归功于他。一直到1725年，他的助手J·克罗斯怀特和阿勃拉罕·夏普才首次发表他的工作成果。他们将他的工作成果发表在为数三卷的《大英天文史》之中，这三卷中包括有2935颗星的位置。用希腊符号标记每一星座中最亮的一些星辰的方法，源出于约翰·拜尔所著的《新天体测量仪》（1603年）一书，由于被《大英天文学史》引用，终于变成普遍通用的方法。

继弗拉姆斯蒂德之后任皇家天文学家的是63岁的数学家兼天文学家艾·哈雷。哈雷年轻时曾因发表一幅南天星表而成名，该表是他于1676年在圣赫勒拿岛上所作观测的成果。1682年，应用牛顿提出的一种确定彗星轨道的方法，他得出结论说，1531年，1607年和1682年的彗星轨道实际上是完全相同的。他猜测，这些彗星，也许还包括1378年和1456年的彗星，具有相同的运行周

期，该彗星的运行周期为75—76年。将木星的微扰吸引力计算在内，他预报该彗星下次将在1758年出现，而这一年该彗星确实出现了。1718年，通过将几颗星的位置与托勒密的恒星表进行比较，他发现毕宿五(金牛座α星)、天狼星及牧夫座α星的黄纬，从初次测定以来已发生了变化，并断言这些恒星必定作固有的运动。

在1691年以及1716年，他注意利用金星凌日——预计在1761年和1769年——来测量太阳视差的可能性。这两年他都按计划作了观测。在他任职皇家天文学家期间，他决定在月球轨道运转的一个完整的周期里——约为19年多——对月球进行观测，来改进当时所使用的月球表。到1731年，他已经能以较高的精确度来确定月球的位置了。他的研究成果直到他死后才于1749年由约翰·贝维斯以完整的形式公布于世。后来，由詹姆斯·布拉德莱牧师继任皇家天文学家。

十七世纪末叶，天文学界的一位重要人物是丹麦人奥勒·雷默。作为巴黎天文台的一位年轻助理人员，他于1675年阐明了在那里所观测到的现象，即距木星最近的卫星进入木星影锥的时间以及从影锥露出的时间并不总与卡西尼在他的表中给出的数值相吻合，当地球远离木星运动时，它们出现得过迟，而当地球向着木星运动时又出现得过早，雷默从这个迹象看出，光通过从木星到地球这段距离是需要时间的，而且从他的观测导出，光通过太阳与地球之间这段距离大约需要11分钟。这样就解决了这个悬而未决的老问题：光的传播速度是有限的还是瞬时的。

在雷默回到丹麦之后，于1682年成为哥本哈根圆塔天文台台长。在那里，他充分利用由于望远镜、显微镜和摆钟的使用而提供的一切可能来改进天文观测技术，在这方面做了有价值的工作。

我们论及的这一时期，天文学活动的特征是派遣考察队到遥远的国家去进行观测。这些考察队的主要目的是设法测量经线一

弧度的长度，测量的结果用于确定地球的正确形状与大小，同时也弄清许多其他事实。

1671年，当一支考察队在卡宴期间，让·里歇从实验确定出地球不可能是一正圆的球体。他发现一座在法国校准了的摆钟在那儿走慢了，这说明了重力强度的值较小，而这只能从假定地球在两极处扁平而得到解释。

1667年，让·皮卡德在北法兰西进行了一弧度的长度的测量。在测量中，他利用了三角测量法来测量最短线部分，该法曾被维尔布洛德斯涅尔用于测量阿尔克马尔和贝亨—沃普—索姆之间的距离，并在他的著作《巴塔维亚的艾拉托斯森奈斯》（1617年）中作了介绍。后来，皮卡德、卡西尼和菲利普·德·拉·伊尔继续在法国的南部进行测量。对于经线一弧度的长度，在北部测得的是56,970突阿斯①，而在南部是57,098突阿斯。根据这些数据，他们断言地球是向两极方向伸长的。这个结果与里歇的观测以及牛顿从理论上所作的地球两极扁平的预言相抵触，这形成了十八世纪前五十年中激烈争论的交点，当时法国有知识的非专业人员亦积极地参加进来。

为了解决这个问题，需要在位于南方和北方国家中的更多地区进行一弧度长度的测量。1735年，皮埃尔·博格和查理·马里·德·拉孔达米纳被派往秘鲁进行经线一弧度长度的测量。在基多，他们测得经线一弧度的长度为56,753突阿斯，较在法国的测量值小。1736年，克莱尔特和莫泊丢在拉普兰的托尔尼欧测得为57,438突阿斯，比在他们本国的测量值大。这样就解决了地球在两极处显得扁平这个问题。根据秘鲁的测量值，其扁平率为1/279，而根据拉普兰的测量值则为1/114。两者中第一个值更接近真实值（约为1/300）。

① 法国长度单位，约合1.98米。——译者注

## 十八世纪的观测

十八世纪，就原理而论没有出现新方法。在这种情况下，实践天文学沿着原来的方向向前发展。

英国天文学家詹·布拉德莱对这一时期的天文工作做出了重大贡献。在1725年到1727年之间，他是以反复测量其极点靠近天顶的天龙座γ星（天棓四）的方位角而开始其观测生涯的，他借助在子午面内建立一个半径较大的圆扇形的方法进行测量，而该圆扇形仅有几度。他的目的是想确定在一年的时间内位置是否会发生可察觉的改变，由此就可确定周年视差。他的确发现了一种周期为一年的移动，但这看来并不象是视差。布拉德莱用光行差（光线进入参与地球周年运动的望远镜，必定要沿着运动方向发生轻微的倾斜）解释了他的观测结果。由此找到了计算光速的一种新方法。测量星体位置除了因运动和大气折射而需作修正外，此外又发现了一项新的修正。布拉德莱还发现了星体位置的第二种周期性变化，周期为18年，这好象是由于地轴的章动而引起的，即将一圆锥运动叠加到进动上。因此，也必须作一项修正。

作为皇家天文学家，布拉德莱在1750年和1762年之间用新获得的仪器作了一系列广泛的观测，在观测中还将由于仪器不完善而可能产生的一切系统误差都极其仔细地考虑在内。他逝世后，关于他的观测资料，英国海军和他的继承者们之间发生了一场冲突，使得这些资料直到1798—1805年才得以发表。对这些观测资料的科学处理，直到1818年才出现在德国天文学家弗列德里希·威尔赫姆·贝塞尔的《天文学原理——根据无与伦比的詹·布拉德莱的观测》一书中。该书为十九世纪的天文学奠定了一个良好的基础。

不断地提高观测的精确性，自然只有在继续不断地提高仪器精度的情况下才有可能。在那些不断提高仪器精度的制造者之中，我们要提及弗拉姆斯蒂德的助手阿·夏普，还有乔治·格雷

姆，后者曾为布拉德莱制作仪器，特别是以发明克服温度对摆长影响的水银补偿器而著名。最后，还有杰西·拉姆斯登，这在前面已经提及。

英国也做了具有重大意义的工作，特别是对时钟的改进，因为这与航海确定经度有关系。惠更斯与虎克的时钟结构已不能达到所需要的精度了。约翰·哈里森是第一个成功地使航海钟的运行实际上不受温度影响的人。他的航海钟在航船上经受了十分严格的考验，而且于1773年获得了20,000英镑的奖金，该奖金是英国政府为求得一种切实可行的测量经度的方法而于 1714 年悬赏的。

布拉德莱非常仔细认真的作风成为格林威治的传统，这一传统为他的继任者、尊敬的纳撒尼尔·布利斯牧师（然而他仅任职两年）和内维尔·马斯基林（他在职46年，一直到1811年逝世为止）继承。内·马斯基林对36颗基本恒星进行了观测，此外还对太阳，月球和行星的位置作了精确的确定。1767年创办《航海历书》，他担任了四十四年的编辑工作，人们认为这是他的最大贡献。

1774年，他在靠近苏格兰狭窄的东西向的希哈连山地区测量了垂直摆线的偏移，由此他推算出地球的平均密度值为4.71。

马斯基林的继任者约翰·庞德对仪器的精度提出了更高的要求，他将他的研究成果汇集成一个有1,112 颗星的星表，并于1833年发表。

在基本位置的确定方面，巴黎天文台落后于格林威治天文台。具有指挥权的卡西尼家族的后代（雅克·卡西尼，塞扎-费兰索瓦-安托万·卡西尼或称蒂里的卡西尼，雅克-多明尼克·卡西尼或称康姆特·卡西尼）把很大一部分注意力放到行星观测、大地测量及绘制法国地形图上了。坚持不懈地进行观测而可与布拉德莱媲美的，是法国天文学家尼古拉斯-路易·德·拉·卡伊（拉卡伊）。在好望角停留期间，他观测了南半球的10,000颗星。

1763年，他发表了其中2,000颗星的星表和一幅天体图，并与柏林的约瑟夫-杰罗姆·德·拉·朗德（拉朗德）协作，在开普敦确定了月球的视差为57′15″，这相当于384,000公里的距离。此外，他改进了牛顿确定彗星轨道的方法，并在1762年发表了新的太阳表。在此期间，德国哥廷根一位勤奋刻苦的观测者托比亚斯·迈尔发表过一份998颗黄道星星表，改进了拉卡伊的太阳表，并且把雷默所测的星位与拉卡伊所测的进行比较，从而确定了一些恒星的固有运动。他扩大了对月球表面的认识，他的关于月球与恒星相对运动的表，于1765年获得了英国政府颁发的3,000英镑的奖金。

他的月球图是继克尔·弗·范·朗热隆(《满月图》,1645年)和赫维留(《月面图》,1647年）先前所作的月球图之后，对月面学的新贡献。

在十八世纪，一个在天文学中开始占有重要地位的课题是确定太阳的视差。天文学家们建议先测出火星或金星的视差，然后再用开普勒第三定律从火星或金星的视差推算出太阳的视差。前边提及的里歇到卡宴岛的考察，其主要目的是配合在巴黎所做的观测，求出火星的视差。在1672年秋季，火星的视差达到一极大值，结果得出太阳的视差为9″·5。拉卡伊应用同一方法，在开普敦对金星和火星进行观测，得到的太阳视差为10″·2和10″·6。1761年和1769年，各国派出了大批的考察队，使用哈雷提出的方法观察金星凌日。他们得出太阳视差的极限值为8″·55和8″·88。

## 十八世纪的天体力学

十八世纪，英国是一个测量天文学的国家，而法国则是计算天文学的国家。当笛卡儿派反对牛顿引力理论的斗争停止后，最主要的法国数学家，再加上贝塞尔的伯努利家族和圣彼得堡的欧勒，专心致力于基本上由牛顿创立并由他发展到一定程度的天体力学的研究。这些科学家将其进一步发展，到该世纪末，已发展

到一个相当的高度。

不久，他们就得出结论：天文学中遇到的力学问题根本不可能得到精确解，而只能用逐次逼近法得到近似解。天文学家们在处理三体问题时发现，如欲确定三个给定物体在一定初始运动条件下的运动，只有在考虑相互间的引力作用时才能实现，这时上述结论马上变得明白无疑。当然，牛顿的万有引力定律是否任何时候和任何地方都精确，仍是一个悬而未决的问题。

但是，欧勒、拉格朗日和拉普拉斯对木星和土星运动所观测到的不规则现象的处理，克莱尔特由计算得出的哈雷彗星将于1758年出现的预言，拉普拉斯对月球的所谓长期加速度（首先由哈雷记述，后由托·迈尔确认）的解释相继取得成功，因而很快就排除了这些疑点。最后，当拉普拉斯在其《宇宙体系论》中（两卷集，1796年）清楚地以简要的形式如同现在一样地处理牛顿的宇宙系统，以及在其五卷巨著《天体力学》(第一、二卷写于1799年，第三卷写于1802年，第四卷写于1805年，第五卷写于1824年—1825年）中以严格的科学方法陈述了天体力学的整个学科时，天文学家坚信，他们对于宇宙结构已经有了明确的了解。更进一步，拉普拉斯还提出了这个有序宇宙起源的理论，并且大胆断言宇宙已经达到最后的稳定状态。

## 新的前景

十八世纪的天文学给那个时代的人以这样的印象：即它已经向着它的终极目标走过了漫长的道路，而且实际上已达到了这个目标。但是，只有人们坚持那些自古已有的观念，如宇宙就是后来我们所认识的太阳系，恒星世界不过是一张不可移动的屏幕，是天体景象自我表演的背景，这种看法才成立。确实，关于这一点，曾不止一次地有过争论，但争论只是在纯粹推测的基础上，而从未导致对这一问题的科学研究。在十六世纪，布鲁诺一直沉溺于宇宙是无限的想象中，并看到恒星犹如很多个太阳，各自都

有绕其转动的卫星体系。在十八世纪，兰贝特在他的《宇宙论书简》(1761年) 中提出了银河和银河系的思想，并作了很多预言，引起了现代读者的注意。但科学不是单靠推测而向前发展的，所需要的是既有丰富想象力又有提出问题和解决问题能力的科学家。这样的人在十八世纪的天文学中出现了，这就是德国音乐家弗·威·赫舍尔（后来成为英国天文学家的威·赫舍尔）。天文学史的新时期随之而开始了。

赫舍尔作为一个音乐家定居在巴斯，业余搞天文学研究。但是，由于仪器不能满足他的要求，所以他于1773年就开始自己磨凹镜，自己制造望远镜。在很长一段时间内，这种制造活动的规模是很大的。就他非凡才能的特点来说，他始终首先是一个描述天文学家。他对天体间本性上的差异比对它们的运动更感兴趣。由于仪器越来越好，他把天空中所能看到的星体编成系统的表，并试图得到一种看法——关于整体结构究竟是怎样的看法。

1773年以后，他花了几年时间特别研究了月球和行星的外表。他发现了火星的白色极冠和极冠随季节的变化。他对火星的观察是对这颗行星进行现代物理研究的开端。他发现了土星的两颗新卫星。他测量出火星旋转周期是24小时39分21.61秒，土星的旋转周期是10小时16分，比以前惠更斯、基·多·卡西尼和吉奥康默·菲利波·马拉尔迪的测量值更精确。

自1778年开始，他试图根据伽利略的方法（确定一个亮星在一年中相对于一邻近星体的位置变化，但是这颗邻近的星的亮度比它本身要差得多，因而其距离也就大得多）确定恒星视差，这不仅激发了他对双星的兴趣，而且使他在1781年偶然发现了一个绕恒星缓慢转动的天体。起初，他把它当成了彗星，但数学家安德斯·约翰·莱克塞尔证明其是一颗行星。经过很长时间的迟疑之后，天文学家们才同意将这颗行星起名为天王星。这颗行星是继自古以来人类早就知道的五颗行星之后第一颗新发现的行星，因而激起了人们的极大兴趣，大大有助于提高赫舍尔的声望

和改进他的物质手段。

由于赫舍尔对天体作了系统的研究，使他得以发表内容广泛的各种星表（800多对双星，几千个星云和星团）。另外，在按顺序标出各方向星的个数的基础上，他第一个绘出了银河结构的大致轮廓，其形状犹如一个双凸透镜。

经过对双星的连续计数，他于1802年得出如下结论：它们不可能都是所谓光学双星（即在视线方向上相近，但彼此并无联系）。他指出几个显然具有物理联系，即因引力作用而互相绕转的双星。从而开辟了天文学研究的一个崭新而富有成果的领域。

1783年太阳向点的测定也确实是赫舍尔的著名发明之一。所谓太阳向点，就是太阳向之运动的天空中的一点（赫舍尔把这一点定在武仙座）。几个月之后，皮埃尔·普雷沃取得了相同的结果。这些理论被弗列德里希·威尔赫姆·奥古斯特·阿格朗德（1837）、弗列德里希·格奥格·威尔赫姆·斯特鲁维（1842）和托马斯·盖洛韦（1847）的研究所进一步证实，因而它起先所遇到的怀疑也被消除了。

我们在谈到赫舍尔时，不能不回忆他的妹妹、可靠的助手卡罗琳。在天文学史上，卡罗琳也有她自己的地位，她是很多彗星的发现者。

虽然赫舍尔卖出很多的望远镜，但是看来使用这些望远镜并未有益于天文学。唯一的例外是德国律师约翰·希罗尼穆斯·施勒特尔，他有几架这样的望远镜，他用这些望远镜（偶尔也用德国的）对月球作了许多次观察。他把他的发现都写入了《月面学片断》一书（1791年，1802年）。

## 十九世纪头五十年的天文学

就天文学而言，十九世纪的头几十年，与其说是更新天文学原理的时期，还不如说是加深和改进理论和技术工作的时期。

十九世纪的头几年，除英国外，德国在仪器制造方面的精密

技术已处于领先地位。1802年，约翰·格奥格·雷普佐尔德的工场在汉堡建立。1804年，格奥格·冯·赖兴巴赫的工场在慕尼黑建立。1806年，弗琅和费受雇而进了赖兴巴赫的工场。1817年，他和约瑟夫·冯·乌奇奈德尔成立了他们自己的光学研究所。

我们可提及的新型仪器有：①赖兴巴赫的子午环。它有一个带刻度的圆环，用于测量倾斜度，它使旧的墙式四分仪永远废弃了。②量日仪。费琅和费制造的一种测微器，有一物镜。其两半可以互换。型式较老的量日仪是博格和拉姆斯登制造的。

因为制造有足够大直径的光学玻璃很困难，所以折射望远镜物镜的大小仍受到限制（最大到15英寸）。另外，反射望远镜也仍在使用，尤其是英国天文学家罗斯伯爵威廉·帕森斯。

观测误差校正的改进与仪器的改进并驾齐驱。在这一方面，柯尼斯堡的天文学家弗·威·贝塞尔的工作是最重要不过的。他认为，只要仪器不可避免的固有系统误差可以精确地确定，当仪器足够稳定时，如果考虑校正，可以说误差是能够消除的。他第一个指出存在观察者个人误差，这是天文学家们常常忽略的一个事实。他还提出了处理这些误差的方法。为了有助于在观察中缩小误差，从1830年起他每年发表一次《误差修正表》。另一个例子是，约翰·弗兰兹·恩克于1822年和1824年在讨论金星在1761年和1769年的两次凌日中，对贝塞尔版的布拉德莱观测材料作了新的精确的修正，他所得到的太阳视差为8″·57。

提供新仪器的可能性，使天文学家试图重新测量恒量位置的年视差位移。贝塞尔对天鹅座61号星作了测量。当他对布拉德莱的观察进行修正时，61号星巨大的固有运动给他留下了很深刻的印象。1838年，他用量日仪测得它的视差为0″·31，1840年为0″·348。差不多同时，F·斯特鲁维在多尔巴特成功地测出了织女星的视差，托马斯·亨德森和麦克利尔在开普敦测得了半人马座α星的视差。

在理论方面也取得了进展。德国医生亨利希·威尔赫姆·奥

尔勃斯于1797年发明了计算彗星轨道的一种新方法。这个方法比拉普拉斯和牛顿的方法简单，只要用几次观测结果就行。特别是伟大的数学家卡尔·弗列德里希·高斯在《关于天体按照圆锥曲线运动的理论》（1809年）一书中，得出用三次观测结果就可确定一个行星或彗星的轨道。该书还发展了从一系列相同量的观测结果中推断出最可几值的最小二乘法。

约翰·库奇·亚当斯和厄本·让·约瑟夫·勒维烈在十九世纪四十年代，分别在剑桥和巴黎成功地解释了天王星由于受距离很远的假想行星的扰动而产生的运动反常。1846年9月23日，由约翰·戈特弗里德·加勒在柏林确证了的那颗行星，出现在勒维烈所预言的位置附近。这是数学天文学所取得的巨大成功。

这颗新发现的行星叫做海王星。这一发现对于天文学家以及公众影响很大，并有助于引起对数学科学的重视。后来弄清，真正的海王星是沿着一条与理论计算不同的轨道运行的，由此认识到除了勒维烈和亚当斯所承认的力以外，还有其他不同的力作用在海王星上。美国天文学家本杰明·皮尔斯和S·C·沃克由此得出结论说，加勒之所以能够根据勒维烈的指示观察到海王星，完全是有趣的巧合。欧洲的天文学家们都已看出，对亚当斯和勒维烈的贬低是不公正的。后来，皮尔斯和沃克原原本本地解释了整个事情的来龙去脉。

在数学天文学领域所进行的许多其他工作中，我们仅提一下关于月球运动理论的编述。有几个学者曾致力于这一工作。彼得·安德里斯·汉森取得了最好的成果，他于1838年开始编制月球表。这些表以一角秒的精度记录了格林威治天文台自1750年以来测定的位置，1857年，这些表由英国海军部出版，在半个多世纪中，用作《航海历书》及其他同类出版物中有关月球全部记录的基础。

十九世纪天文学的一个典型特点是编制“星表”，即编制范围很大的恒星区中具有确定亮度的全部恒星的系统表。星表这个

名称来自“波恩星表”，这是由F·W· 阿格朗德及其同事从1852年到1859年在波恩对北半球所进行的观测。后来，他的继承人艾德瓦德·舍恩费尔德把这一观测向南扩展24°。他说他的目的不是为了取得恒星位置的最大可能的准确性，而是为了编制就统计目的而言有用的统一星表。J·M·托梅于1885年开始编制从22°偏角直至极区的南半球“科尔多瓦星表”（阿根廷的科尔多瓦）。后来，这种“星表”经常由许多天文台联合编制，每个天文台观测某一特定区域。由十三个天文台参加的这种合作，1871年由德国天文协会举办过。

摄影技术一进入天文学，就立即成了进行更广泛观测的重要工具。它导致了1887年由十二个天文台参加的名为“全天照相星表”计划的产生。同时，它也非常有效地应用于由大卫·吉耳和雅可布·科恩尼留斯·卡普坦组织的“好望角照相星表”，结果编制出了在19°南偏角至南极之间包含第十一星等在内的45万颗星的星表。

当慕尼黑研究所的望远镜问世后，对月球表面的研究达到了新的高峰。在施勒特尔之后，威尔赫姆·戈特黑尔·洛尔曼于1824年首次发表了内容只有几页的新月球图。比它更完善更详细的是威尔赫姆·比尔和约翰·亨利希·冯·梅德勒于1834—1836年发表的月球地形图，共分四卷，是他们在精确测量的基础上，经过八年时间的研究结果。1837年，他们对当时所了解的月球情况发表了一个提要《普通比较月面学》。1850年，哈佛大学天文台台长W·C·邦德拍摄了第一张令人满意的月球照片。

亨利希·施瓦布在德绍用望远镜对太阳黑子进行了40年的系统观测，推进了对太阳的研究工作。他在1851年宣布太阳黑子数的变化周期大约为10年；这个数值后来修正为11.1年。同年，约翰·拉芒德在慕尼黑宣布，他已经观测到地磁要素的变化也有同样的周期。1837年，约·赫舍尔爵士和克劳德·普耶测量了太阳辐射强度，并确定太阳常数为1.76卡/厘米$^2$·分。

从1842年起，在日食期间对日冕和日珥进行了系统观察。很明显，人们仍然普遍地坚持亚历山大·威尔逊在哥拉斯哥所阐述的、而后为赫舍尔所继承的理论，即太阳黑子为光球上的孔洞，通过这些孔洞可以看到太阳黑暗的中心部分。

在行星研究中，比尔和冯·梅德勒于1830年在有利的相冲期间第一次作出了火星的表面系统图。从而为后来大量进行的火星表面研究奠定了基础。1850年，威廉·拉塞耳和W·C·邦德发现了土星的一颗新卫星，即第八颗卫星。他们又与威廉·鲁特尔·道斯一起发现了土星的所谓火环。

小行星形成了一条新的研究分支。1801年1月1日，基塞浦·皮亚齐发现了小行星——谷神星。高斯能够用新的方法根据皮亚齐所能做到的极少的观测资料来确定这颗小行星的轨道。因此，当它消失在太阳光中以后，可以再找到它。在该世纪的头七年中，又发现了其他三颗小行星：H·W·M·奥尔勃斯于1802年发现了智神星（小行星2号），卡尔·路德维希·哈丁于1804年发现了婚神星（小行星3号），奥尔勃斯于1807年发现了灶神星。1850年前后，又发现了九颗。从那以后，由于通过摄影而发现了很多小行星，所以小行星的数目激增。在小行星研究中，所谓提丢斯—波德定律起初起了很大的作用。它是表示行星和太阳之间距离的一个经验定律，可表示为：

距离$=0.4+(0.3\times 2^{i})$，式中$i\geqslant 0$，这个表达式的建立，通常归功于维滕贝格的教授约翰·丹尼尔·提丢斯（有人归功于克里斯琴·沃尔弗），但也以1774年创办天文学年鉴（以后命名为柏林天文学年鉴）的约翰·埃勒特·波德命名。没有与$i=3$（距离$=2.8$）相对应的行星，因此，奥尔勃斯认为，原来在此位置上的行星已经分裂成当时所知道的四颗小行星了。

十九世纪初，地球每天绕轴转动一周几乎是人人皆知的既定事实了。但还有一个未被实验所证实的理论推测，即垂直下落物体的偏离。牛顿曾预言，当物体垂直下落时一定会产生偏离而方

向向东，但虎克在1679年未能确定这种偏离——他所取的物体下落高度太小了。

约翰·弗列德里希·本岑贝格于1802年在汉堡，1804年在施赖堡，费迪南德·莱欣1831年在弗赖堡从很大的高度进行实验，发现了与理论相一致的向东偏离（但未发现也是高斯所预言的向南偏离）。1851年，傅科在巴黎万神殿作了一个重摆的摆动平面相对于周围物体逐渐转动的演示实验，对地球绕轴自转作了引人注目的经验证明。演示时有很多观看者，后来还经常重复这个演示。

在十九世纪头五十年中发现了大量的彗星（绝大部分是用望远镜发现的），其中大约有三十颗可以用肉眼看到。下述两颗彗星应特别提一下：

①恩克（Encke）彗星。1818年由让·路易·庞斯发现，但以恩克命名，这是因为恩克为了确定其轨道而做了大量的计算工作。该彗星最短转动周期为3.3年。恩克认为，它的转动周期的继续缩短是由于转动受到周围介质阻力的缘故。

②比拉（Biela）彗星。转动周期为6.75年，当1846年第五次观察到它时，似乎已分裂成两半。1852年后消失。

1812年，奥尔勃斯提出了彗尾是由在太阳静电斥力的作用下从彗头或彗核流出的稀薄物质所组成的理论。

直到十九世纪末二十世纪初，人们才开始对流星感兴趣。1794年，E·F·F·克拉尼认为，流星是掠过空间的小物体，当它们闯入地球大气层时开始发光。根据他的建议，H·W·布兰德斯和约·弗·本岑贝格于1798年同时在不同地方进行观测，测得了流星可被看见时的高度。1833年11月12日在美洲观察到了强大的流星群（十一月流星群）（当时也利用了1799年亚历山大·冯·洪堡的一次观测资料）。1836年8月观测到兰伯特·阿道夫·雅克斯·凯泰莱所确定的英仙流星群（八月流星群）以后，认识了周期性的流星群现象。

威廉·赫舍尔在天文学研究中所循的新方向，在他去世以后

仍然继续着，最主要的是他的儿子约翰·赫舍尔爵士。他从1825年到1833年在北半球，从1834年到1838年在南半球继续探测流星群、星云、双星和星团。在南半球，他同时重复进行他父亲开创的对恒星密度的统计研究，后来，他致力于他自己和他父亲的观测材料的收集和整理，进行各种科学研究及撰写科学著作，其中包括再版多次的《天文学纲要》（1849年）。

## 天文学史新时期的开始

十九世纪的后半叶，天文学出现了一个大改观。这个大改观极为重要，所以我们不得不在结束我们的天文学史概要之前，介绍一下这方面的情况。这个大改观主要表现在应用光谱分析来研究天体，这样，天文学的一个崭新分支——天文物理学产生了。在此以前，天文学家们不得不仅仅研究天体的几何性质，如运动状态、形态、距离、高度等。光谱分析的应用突破了这种局限，而把天体的物理-化学构成纳入天文图景。随着这一新分支的发展，直到1835年天文学才成功地完成了实证主义哲学创始人奥古斯特·孔德断言不可能办到的事。

我们在第二十一章中简略地介绍了光谱分析的起源。光谱分析一出现，几乎立刻就被应用于天文学研究。基尔霍夫用一任意假设的刻度确定了几千条弗琅和费谱线的位置，证明这些谱线与十种地球元素的发射谱线相对应。用这种方法，证明了在太阳大气层中存在这些元素。应该把H·C·沃格耳和安杰罗·塞奇神父看作是恒星光谱学的真正奠基人。赛奇马上将光谱作为分类方法，区分出不同的光谱类型。他把恒星分成四类。后来查理·约瑟夫·沃尔弗和乔治·安都昂·庞斯·拉叶在巴黎又增加了一类，共分五类，以后均以他们的名字命名。这种分类最后被1890年由哈佛大学天文台开始使用的德雷珀星表所代替。在这个星表中，各种类型顺次用字母O、B、A、F、G、K、M、N表示，其中O表示沃尔弗-拉叶星，B和A对应于赛奇一类，F、G、K对

应于二类，M对应于三类，N对应于四类。早在1860年，威廉·哈根斯爵士就已应用多普勒原理来测定天体的视向运动，并用这种方法测得三十颗恒星的速度。摄影术的应用应归功于H·C·沃格耳和约翰·威廉·德雷珀。德雷珀还于1882年拍摄了猎户座星云光谱。

由于约瑟夫·诺曼·洛凯尔棱镜摄影机的出现，以及后来(1890年—1891年)亨利·亚历山大·德朗德尔在巴黎，乔治·埃勒列·赫耳在芝加哥制成了分光太阳摄影机，使天文分光仪器充实起来了。1868年8月18日，在印度第一次用分光镜观察日食，并观察到了日冕和日珥。后来，根据朱尔斯·詹森的建议，进行全天观测。这次日食期间，在太阳上发现了新元素氦。

# 第二十三章

# 十八、十九世纪的电磁学

## 十八世纪的磁学

在吉尔伯特以后的二百年中，磁铁的制造未取得任何进展。当时，一方面集中力量企图使用磁舌来发现很强的天然磁铁，另一方面又采用各种方法来制造人工磁铁，如用条形铁与天然磁铁摩擦并把它们叠放在一起。起初使用的磁铁都为条形磁铁。根据丹尼尔·伯努利的建议，巴塞尔仪器制造商约翰·迪特里希把条形磁铁弄弯，使两极靠近，这样就产生了第一个马蹄形磁铁。

约翰·米切尔测量了作用在每一磁极上的作用力，并在他所写的《人造磁铁》一书中发表了他的测量结果（1750年）。他第一次提出吸引力与排斥力的平方反比律，并于1785年被查里-奥古斯·德·库仑用扭秤实验所证实。

十七世纪和十八世纪有很多幻想色彩尝试的记载，它们试图在笛卡儿或伽桑迪假设的基础上来解释磁。弗兰茨·特奥多·埃皮努斯是单磁流的创始人，根据这个理论，磁流的法向密度在磁铁两极处增加或减少。库仑赞成双磁场论，一个是北，一个是南（相当于阳性和阴性，或者正电和负电）。

天文学家艾·哈雷在地磁场方面做出了重要的

贡献。他根据自己在1698年到1700年任军舰指挥官期间所做的亲自观测，于1701年发表了经改进的等比例地图。他设想地球有四个磁极，每半球各有一个强磁极和一个弱磁极。1722年，乔治·格雷姆发现了磁偏角的周日和周年变化以及磁倾角的周日涨落现象。

## 静电学

由于在航海方面的重要作用，人们对于磁已经进行了很长时间的研究，而且磁的研究比较容易联系实际经验。电则不同，在十七世纪，它仅被看作是一种奇妙的但不很重要的现象。而对于它的认识，仍停留在古人早就知道的物体摩擦后便“带电”，即具有了吸引轻小物体的能力等现象。尽管吉尔伯特通过研究而提出了自己的一套理论，但情况仍然如故。十七世纪末有了一些进步，但一直到十八世纪才迈出了第一步。电（起初只局限于静电）成了许多自然哲学家最喜爱的研究课题，引起了许多把科学实验当作业余爱好的富裕阶层人士的浓厚兴趣。

这个新的发展是以奥拉·冯·格里凯和弗朗西斯·豪克斯比为首进行的。奥·冯·格里凯在他的《马德堡新实验》（1672年）中描述了一台早期的摩擦起电机，这台摩擦起电机由一个硫黄球和一个干燥的环槽组成，当硫黄球转动而与环槽摩擦时，便在其上产生电荷。弗·豪克斯比在他的《物理数学实验》（1709年）中谈到摩擦旋转着的玻璃球、封蜡或硫黄球会产生长火花的实验。他发现不能在空气潮湿的地方做这样的实验，也不能使拿在手里的金属棒带电。

经过实验研究，斯蒂芬·格雷很快就在1729年对这些观察结果作出了解释，并把物体分成导体和绝缘体。大约在同一时期，迪费证明了电有两种，他把摩擦玻璃棒产生的电叫做阳电，把松香与毛织品摩擦后松香所带的电叫做阴电。在这一方面，我们还应该提一下法国物理学家泰奥菲尔·德扎格利埃。他逃到英国

后，在十八世纪的头十年中做了大量的工作，激发了人们对实验科学的普遍兴趣。

在十八世纪，经过各国许多科学研究工作者和仪器制造者的努力，起电机逐步得到了改进，当时比较流行的型式是：外面裹着汞齐的橡皮中间，是可旋转的大玻璃圆盘，附有电梳和电容器。电梳用来消去电荷，电容器用来储存电荷。在这一方面作出过较大贡献的有德国的克里斯琴·奥古斯特·豪森、约翰·亨利希·惠克勒、约翰·弗列德里克·吉辛、格奥格·马蒂阿斯·博塞和弗兰菲·冯·金迈尔，英格兰的约翰·坎顿、威廉·黑金斯、本杰明·威尔逊和威廉·沃森，侨居德国的苏格兰人安德里阿斯·戈登，瑞士的马丹·普朗泰，法国的简-安让乌·德·拉·芳登与荷兰的简·英吉豪兹，我们不一一列举其具体贡献了。

到了十八世纪末，起电机已很普遍，例如仪器制造商约翰·卡斯伯特森就为荷兰哈勒姆的泰勒学院实验室主任马蒂纳斯·范·马尔乌姆制造了一台供实验用的起电机。这台起电机现仍在荷兰的哈勒姆。

电容器（或蓄电瓶）是一个很重要的发明。它是伊瓦尔德·格奥格·冯·克莱斯特大约于1745年在波美拉尼亚的卡明和皮特勒斯·范·莫西伯拉克及其助手们在莱顿分别独立发明的，瑞士生物学家阿拉伯罕·特兰布利在他的一封信中最早提及这个问题。信中说，他的同胞让-尼古拉·阿拉曼特于1745年初在莱顿做了一个实验。实验过程是先使一只拿在手里的瓶子里的水带电，然后与另一只瓶子分开。范·莫西伯拉克又重复做了这个实验。这个发明引起了人们极大的兴趣，因为它可以获得比当时所能获得的强得多的电荷。后来，法国一位受人爱戴的实验家让-安都昂·诺莱特（1700—1770）把这个发明传播于世，他把这个装置称做莱顿瓶，尽管在德国经常称做克莱斯特瓶，但莱顿瓶这一名称现在仍为大家所熟知。

正是欧洲的电学知识促使费城的出版商和业余科学家本杰

明·富兰克林(1706—1790)进行实验和理论研究的，这些实验和理论对于以后的物理学发展是极其重要的。其著名的避雷针的发明首次于1752年由达利巴德在法国的马利作了表演。后来，他本人又在著名的风筝实验中作了表演。这一发明引起了全世界的极大兴趣，并导致了许多其他实验的出现以及人是否应该用这种方式来干预被普遍认为是上帝意志直接表现的自然现象的争论。

更为重要的是富兰克林使实验研究进入了天电。这引起了法国内科医生路易-吉约米·勒莫尼埃（大约 1750 年）和意大利物理学家乔范尼·巴蒂斯塔·贝卡里亚的注意。俄国物理学家格奥格·威尔赫姆·里奇曼在这一研究中献出了生命。他是1753年 8 月 6 日在圣彼得堡冒着暴风雨观察天电指示器时遭雷击而丧身的。

在谈到电的本性的理论时，也应该提到富兰克林的名字。和磁学一样，在电学中也有两种对立的理论，即单电流体论或一元论和双电流体论或二元论。根据富兰克林所创立的一元论，所有物体都包含有一种电流体，这种电流体可能超量，也可能不足，前者的电荷称为正，后者的电荷称为负。显然，想通过实验来发现它是不可能的。当时选择阳电为正，后来证明，这种选择不好。我们现在习惯上所说的直流电流的方向正好与形成电流的电子运动的方向相反，原因就在于此。根据迪费所承认的，而且得到英国物理学家罗伯特·西默捍卫的二元论认为，一个中性物体包含有等量而相反的电流体，要使这样的中性物体带电，就得把这两种电流体分开。这里也是武断地用“正”和“负”来描述。两种理论均可以解释首先由冯·格里凯观察到、后来由埃皮努斯作了专门研究的静电感应现象，但二元论最终获得了绝大多数人的支持。

在静电感应实验中，使用了各种各样的验电器或静电计，但最后以亚伯拉罕·贝内特的金箔验电器（1787年）最为出名。

在扭秤实验的基础上，库仑创立了电荷间作用力的定律，叫

做库仑定律。同时，他用实验证明了电荷只分布在导体的表面，带电的中空导体内不存在电场。

在十八世纪，虽然除了产生电火花以外，还没有别的办法能使电荷移动，但都认为电用于化学是可能的。亨利·卡文迪许（1731—1816）让电火花通过由脱燃素气体（氧）和可燃气体（氢）组成的混合气体后，发现形成露珠，证明是水。这一合成过程与荷兰化学家琼·鲁道夫·戴曼和艾德里安·佩茨·范·特罗斯特维克的分析研究形成对照，戴曼和特罗斯特维克于1789年发现，当电容器通过水而放电时，水被分解。

现在看来，虽然由于电学理论仅局限于静电学，使它在整个十八世纪一直处于萌芽状态，但比其他学科先进多了，这有历史的记载为证。约瑟夫·普利斯特列在他的《电学的历史和现状及最初的实验》（1776年）中说明了这种状况。

## 流电学

实际上，使电成为世界上如此巨大力量的全部发现，在十八世纪末仍在继续。其中最重要的是电流的发现，它是意大利解剖学家阿洛伊西奥·伽伐尼在十八世纪八十年代的研究成果，并在《论肌肉运动中的电力》（1791年）一书中报告了这项成果。

要对伽伐尼的发现作简要而又全面的介绍几乎是不可能的，因为我们所知道的有关这方面的情况有许多矛盾之处，他自己的观察结果与我们现在的想法有很大差别，因而，很难仿效和重复。但可以说，他对在某些情况下（不论在靠近时放电还是与此相反）青蛙腿肌肉收缩现象的解释与后来的解释完全不同。他把这种肌肉收缩看作是动物电的表现形式，这是十八世纪科学界争论的中心问题，当时认为动物电在动物脑中有一个活动中心，从那里由神经系统传至肌肉。每一肌肉纤维是一个小电容器，放电时便产生收缩。

伽伐尼的发现引起了极大的反响，他的解释也为大家所接

受，其中还包括后来成了他最有力的反对者的意大利物理学家亚里山德罗·伏打（1745—1827）。后来发现，与伽伐尼相类似的发现早已有过，例如瑞士物理学家约翰·格奥格·苏尔泽于1760年就谈到，当他将一块银放在他的舌头上，又把一块铅放在舌头下面，并使其边缘相碰时，会产生味觉。意大利解剖学家列奥普尔多·马雷、安东尼奥·卡尔达尼于1756年就观察到青蛙在电的影响下会收缩。但是，只有伽伐尼的名字至今仍与整个复杂现象联系在一起，甚至由此而引起的完全新型的产生电的方法，尽管完全是伏打的功劳，但仍然用伽伐尼的名字来命名。因为不少其他术语也是从这个术语派生出来的，所以伽伐尼的名字在科学术语中占据了比他的实际贡献重要得多的位置。

把这个物理现象从原先由伽伐尼加以阐述的生理学范畴中分离出来，是伏打的巨大功劳。他认为，从物理学的观点看，在由青蛙的湿腿和用来将青蛙挂至一铁棒的铜钩所组成的系统中，只有金属和液体是相关的，而青蛙腿只相当于一个验电器。伏打在物理研究中所提出的概念和理论，长期以来已属于电学理论：如由潮湿的不同金属相接触而产生电势差效应（伏打效应），“电势或电压系列”中这些金属的排列，控制它们的定律，仅由这些金属的接触来产生电流的不可能性，以及电解液在电压系列中的无关紧要，因此用两种不同的金属和一种电解液放在一起便可做成原电池等。

伏打在1800年3月20日用法文写给皇家学会主席约瑟夫·班克斯爵士的信中谈到了这种可能性。在信中，他对这种后来用他的名字命名的电堆（伏打电堆，后来很快被称做“电堆”）进行了描述。这种电堆由几对按相同次序用布或硬纸板隔开的锌板和银板组成，并浸泡于食盐溶液中。他提到的另一种形式是杯冠，它是一排用弯曲的金属片连接的盛有盐水或稀酸的杯子，这些金属片一半是用锌做的，另一半是用铜做的。他把这个装置叫做人造电器官，以与在电鱼身上发现的自然电器官相对应。

伏打试图来解释电堆工作原理的所谓接触理论，并未被普遍接受。伽伐尼的动物电观点继续获得支持者，在这些支持者中，最重要的是多才多艺的德国学者亚历山大·冯·洪堡。一般说来，法国物理学家都同意伏打的看法。

对伏打来说，要很快使每个人都相信众所周知的摩擦静电和新发现的动电的一致性是很困难的。他发现洪堡也反对他。但他的观点得到德国物理学家保罗·埃曼、约翰·威尔赫姆·里特和已经提到过的马·范·马尔乌姆的支持。马尔乌姆提供了用哈勒姆泰勒实验室的强大电学设备获得的实验证明。

在伏打给皇家学会的信发表之前，看过这封信的英国科学家威廉·尼科尔松和安塞尼·卡莱色尔爵士就已宣布，他们已经用电堆把水分解成氢和氧，从而开辟了一个完全崭新的研究领域，并且有很多人开始了这一研究。在这些人中，值得一提的是英国人威廉·克鲁克香克、瑞典人耶恩斯·雅格布·伯齐利乌斯和W·希辛格以及德国人约·威·里特。尤其是汉弗莱·戴维的工作极为重要。他在1807年用电解的方法制取了钾和钠两种元素。

利用伏打电解电池所取得的发现之一是金属导线中的电流和电弧所产生的热。电弧是戴维于1812年在一强原电池（或电池）的两极间观察到的。

伏打电堆和杯冠及其改进型式，即由吉乌西帕·赞布尼于1810年再次发明的格奥格·伯恩哈德·贝伦斯（1802年）干电堆，在很长一段时间内，是仅有的能供实际应用的电池。它们都有由于极化而电流很快减小的缺点。大约从1830年起，为获得恒压电池作了不少尝试，其中约翰·弗莱德里克·丹尼尔（1836年）、威廉·罗伯特·格罗夫爵士（1839年）、罗伯特·威尔赫姆·本生（1841年）和乔治·勒克朗歇（1867年）取得了成功。

约·威·里特于1803年第一次试图制造二次电池或蓄电池，他将用完电的水电解装置的极化电极作为电极，1843，格罗夫对此进行了研究，但是直到1859年，真正实用的蓄电池才由雷蒙德-

路易-加斯顿·普朗特制造出来。经进一步改进，证明可以作为商品而大量生产。

如果我们对于借助电池而取得化学发现留有深刻印象的话，对于科学家们同时试图将电的概念应用于理论化学就不会感到奇怪了。戴维首先提出这样一个理论，即两种物质接触时所反映出来的相反的带电状态，可看作两者化学关系的性质。接触时，异种电荷将互相中和；在电流流通的过程中，带正电的元素跑向电池的负极，而带负电的元素跑向正极。德国化学家冯·格罗杜斯的电解理论遵循同样的过程。根据这个理论，电解质之所以会被分解，其根本原因在于电流通过溶液的金属电极时作用在分子带电部分的吸引力和排斥力。把这一观点稍加修改，就变成了奥古斯特-阿塞·德拉里夫理论的基础。

电的概念在耶·雅·伯齐利乌斯的化学体系中占有很重要的地位，他把电极强度不相等归因于原子的不同。占主导地位的电极决定总的带电状态。于是就产生了把元素分成正负的分类方法。化合物分子具有相似的极性，因此，认为化合完全是异种电荷互相吸引的结果。

戴维和伯齐利乌斯的理论最后被抛弃了，但电力在物质结构中起作用的思想保留了下来，它取代了那种在十八世纪占统治地位的、把物质结构看成犹如天体一样是因为万有引力起作用的观点。化学过程和电过程的密切联系再次导致了对伏打接触理论的批评。戴维找到了电堆在化学过程中产生作用的原因，他证明，纯水不能被电流明显分解，电堆的作用取决于导电液体使负电极锌氧化的能力。此后，两种理论支持者之间的思想论战持续了几十年。不过在这场思想论战中，各自都在对方的影响之下逐步地作了相当大的改变。

## 电磁学和电动力学

自从十八世纪初以来，电学理论几乎完全集中在电化学方

面。1820年，一个新的很重要的发现，即电磁之间的密切关系才使其内容得到了充实。很长时间以来，人们一直推测这两种彼此独自发展的现象有这样或那样的联系，由库仑建立的电磁力定律的一致性，正象在这两个领域中发展起来的“流体”理论的一致性一样，似乎证实了这种思想倾向。但是，科学家没有能够成功地用实验来证明这种关系。

丹麦物理学家汉斯·克利斯提安·奥斯特于1820年完成了这一工作。他在研究自然哲学的过程中，一直注意这个问题，他相信所有自然力的一致性，从而直观地确认存在一个真实的基础。后来，他偶然想到将蓄电池的引线平行于磁针，而不是象他以前所做的那样垂直于磁针。他立刻看到了现在众所周知的效应。当引线方向相反地放在磁针上时，磁针就偏转到相反的方向。

奥斯特在1820年 7 月公布他的发明时，首先碰到的是怀疑，但在得到进一步的证实以后，引起了极大的兴趣。第一个较为明显的反应是，这个事实说明，直流电流作用在磁极上的力垂直于两者所在平面的某一特定方向，而这个特定方向只能根据实际经验来判断。科学家们习惯于用吸引力和排斥力来思考问题。从对称的原理看，他们认为这个新发现的效应是不可能的。实际上，这个新发现所特有的不对称性，给当时的物理学引进了一个新的概念。

1820年 9 月 4 日，阿拉贡在巴黎科学院周会上宣布了奥斯特效应。起初，阿拉贡本人仍怀疑其真实性，但后来德拉里夫在日内瓦做了一次表演，他相信了。9 月11日，阿拉贡亲自做了一次，这在数学家昂德累·马里·安培敏捷的头脑中留下了鲜明的印象，并激励他开始从事他从未作过的电的研究工作。9 月18日和25日，安培公布了他在前几天所取得的一系列新发现，以及在实验基础上建立起来的对电磁关系新假说的全面报告。通过这些实验，他研究了载流导线之间的相互作用力和载流螺线管（他当时创造了这个新术语）的磁性。这个新假说认为，在磁铁中，电流

沿很小的环路流动，每个环路平面与磁轴垂直。因此，他提出了地磁来自地球电流的解释，认为由实验确定的载流导线框上所受到的力显然是地球作用在它上面的，并使它转向垂直轴。当这样来解释电动力学的实验原理以后，安培试图建立一个对所有已经观察到的作用力普遍适用的数学表达式，即建立一个象牛顿万有引力定律那样的电学模拟公式。这就得表示出给定距离及连接线上给定相对位置的无限小载流导线元之间的相互作用力，再通过积分推导出所有电磁现象定量的动态特征。1827年发表的一篇专题论文达到了他原来所考虑的目标。论文的式样与牛顿原理完全一致，因为他并不想从更多的基本假设去推导出假设的力。

安培采用数学方法来处理电动力学现象，确实使他实现了他原先所设想的目的，但是对电学理论来说，并非具有永久性的价值。后来的发展则是沿着一条完全不同的路线进行的。当然，这并不影响他的发现的巨大意义。在奥斯特证实了假想的电磁之间的密切关系之后，安培完全弄清楚了：电与磁的关系要比想象的密切得多，即磁不是与电分开的孤立的东西，而是电的多种特性的一个方面，这多种特性同样也在静电及电化学反应中表现出来。即使磁铁矿从未发现，磁现象也仍然会在对电流的进一步研究中遇到，只是那时可能会给它起一个完全不同的名称而已。

## 电流计

1820年，德国物理学家约翰·扎洛莫·克里斯托夫·施魏格尔将导线环绕磁铁许多圈，使对一旋转磁针的电流效应增强许多倍，从而制成了电流计，当时叫做“倍增器”。1825年，意大利人列奥普尔德·诺比利对倍增器作了改进，他采用无定向磁针系统来减弱地磁阻尼效应。1839年，法国物理学家克劳德-塞尔芬-马蒂阿斯·普耶发明了正切电流计和正弦电流计。威廉·汤姆·达尔生伏尔以及其他人所发明的带反射镜读数的线圈式电流计，大大地提高了灵敏度。

安培的螺线管在原则上使建造强大的电磁铁成为可能。在整个世纪里对其进行了多次改进，因而大幅度提高了承载能力。在此，必须提及英国人威廉·斯杜尔吉和美国人约瑟夫·亨利的名字。

电磁学的一个实际应用是电磁电报，后来它对人类社会产生了极为重要的作用。它的原理显而易见，难怪有些学者，其中包括哥廷根的卡尔·弗列德里希·高斯和威尔海姆·韦伯以及阿尔伯尼的约·亨利，曾致力于这方面的研究。在英国，查理·惠斯顿对此作了很大的技术改进。而在美国，塞缪尔·芬利·布里斯·莫尔斯提出了至今仍与他的名字联系在一起的字母电码。早在1837年就开始了海底电报的实验，但第一条横渡大西洋的电缆直到1857年才铺设完。威廉·汤姆逊（凯尔文勋爵）在解决这个工程所碰到的各种问题中作出了重大贡献。

## 电磁转动

1821年，武拉斯顿用电磁力产生连续转动失败。同年，迈克尔·法拉第实现了这一目的。法拉第成功地使得磁针环绕一个载流导线连续运动，同时利用地磁使一导线产生转动。这个问题继续引起广泛的注意，但是要想看到实际使用的希望并未实现。

## 蓄电池电流和温差电流

1823年，德国物理学家托马斯·约翰·塞贝克发现了用与蓄电池不同的方法产生电流的可能性，具体地说，就是用两种不同的金属做成一个传导环，并保持两个接头处于不同的温度之下。热电动力的大小取决于金属的性质，并与两接头的温差成比例。

1834年，巴黎的钟表工人让-查理-阿塔纳斯·佩尔蒂埃证实，用冷却代替加热，能够产生微弱的直流电流，这个电流和由两种不同金属连接成的金属环的一个接头加热时所产生的温差电流一样，也沿一个方向流动（佩尔蒂埃效应）。诺比利将许多这样

的温差元件连在一起，制成了温差电堆，或温差倍增器，这在红外线的研究中起了很重要的作用。

有时宁肯使用温差电流而不使用蓄电池电流，因为蓄电池电流有时随电压变化。因此温差元件被用于一些重要的实验中。格奥尔格·西蒙·欧姆于1826年用这些实验建立了以他的名字命名的基本定律，即欧姆定律。一年后，他在《电路的数学处理》一书中给出了这一定律的数学推导。欧姆使人们正确使用诸如电动力、电流强度和电阻这样一些术语，并清楚地用实验证明：一导线电阻的大小取决于导线长度、截面积和所用材料，这是他的伟大功绩。随后，英国科学家查·惠斯顿找到了精确测量电阻的方法，现在仍称为惠斯顿电桥。

## 电磁感应

在十九世纪的头三十年中，电磁理论发展得很快，但是使它的现代发展和非常重要的技术应用成为可能，还要完成一个重大发现。这就是1831年迈·法拉第电磁感应的发现。这项发现是他本人和其他科学家一起努力的结果。很长时间以来，法拉第已经持有这样一个想法，即一导线中的电流可能在另一没有电池的相邻导电回路中产生电流，就如一带电物体使在其邻近导体中产生静电荷一样。在这种想法支配下，他频繁地进行实验，但一直没有成功。1831年 8 月29日，他在同一个软铁芯上绕了两个不相连的线圈，一个是初级线圈，接有伏打电池，另一个是次级线圈，接一电流计，试验一下如果电流通过初级线圈时，次级线圈中能否有电流出现，其结果是否定的。然而，当他以为实验又一次失败而切断初级线圈中的电流时，看到次级线圈中电流计的指针突然偏转了一下。紧接着的研究证明，次级线圈中所产生的“感应电流”，不是因为初级线圈中电流的存在，而是因为初级线圈中电流的接通、切断或强度的变化。除了考虑可能与静电感应相似的现象以外，法拉第还经常考虑用磁来产生电流的可能性，从而产

生与奥斯特效应相似的效应。后来证明这是可能的，即当将一磁棒放入或拿出一个闭合线圈，或磁棒相对于该线圈运动时，该线圈中就会有电流产生。同时他还观察到，当次级线圈相对于初级线圈或一磁铁运动时，也有感应电流产生。

与他同时代的有些人，一开始认为这个发现无足轻重，但法拉第立刻清楚地认识到这一发现的巨大理论意义。他还意识到这个发现在技术上也是重要的。为了对线圈中产生感应电流的条件，或在更多的情况下一个闭合的或非闭合的回路中产生感应电动势的条件进行概括说明，他使用了他所喜欢的想象的磁力线，借以解释磁现象。产生感应电动势的条件是导线应切割磁力线，感应电动势的大小与每单位时间内切割磁力线的数目成比例。法拉第一直坚持使用力线图，他在1851年再一次强调，力线图可以表示所有可由实验确定的现象。力线图之所以得到使用，是由于铁屑在磁铁周围的排列所形成的著名图案证明了它的存在。他把这样的图案理想化，把它想象成为充满整个空间的许多线，而线上每一点的切线就是磁场强度的方向。他引入了力管和单位力管的概念，从此以后，它们便成了物理学最基本的概念。

在法拉第发现感应电流的同时，美国人约·亨利也发现了相似的现象。1829年，在进行电磁铁承载能力试验的过程中，他看到在断开用一条长导线绕在一软铁上的线圈中的电流时，出现了强烈的火花。这样就发现了自感现象。1832年，他发表了一篇关于自感现象的论文。同年，英国的威·詹金斯告诉法拉第，当断开一相似回路时，他受到了电击。这导致法拉第于1835年发表了关于形成与断开回路时的“额外电流”的研究结果。

和法拉第一样，亨利也试图从磁得到电。在1830年和1831年，他获得同样结果。在数学和科学史上，我们可能看到某一现象屡次发生，也就是某一项发明差不多同时由几个研究人员独立完成的情况。

在电磁感应原理的许多应用中，我们仅提一下由磁场的连续

变化而在很大的金属体中产生的所谓“傅科电流”或涡流。这种电流有时是有害的，它会引起能量的损失，但有时也可找到技术上的应用价值。

在实验中，法拉第和亨利无意识地使用了变压器。在十九世纪，众所周知的可以产生高压放电的一种装置是感应圈，通常是以侨居巴黎的德国仪器制造商亨利希·丹尼尔·鲁姆柯夫来命名的。感应圈始于1851年，在此以前，美国的格拉夫顿·佩奇已经于1838年制成了一个感应圈，并于1851年作了改进。后来又作了多次改进。关于在电工技术中闭路变压器的重要作用，我们在此不作介绍了。

电磁感应的发现很快导致人们试图产生可供技术应用的强电流。起初，科学家们通过转动永久磁铁极间线圈的方法来达到上述目的，此方法获得了成功。后来又把永久磁铁改成电磁铁。安东尼奥·帕西诺蒂和泽诺布·泰奥菲尔·格拉姆分别于1861年和1868年独自发明了将交变电流变成直流电流的方法。维尔纳·冯·西门子于1866年提出了具有重大意义的所谓发电机原理，产生电流的磁场由机器本身的电流来产生。这是由于极片中的剩磁在起作用的缘故。

关于电磁感应在交流和三相发电机中以及在各种电动机中的很多应用，这里不能一一介绍了。由于电工工艺的发展，首先使电灯泡的实际使用成为可能，这是以前曾经多次设想过的。从1877年到1880年的几年中，很多发明家都在忙于这方面的研究，其中托马斯·阿尔发·爱迪生（1847—1931）是最成功的一个。

## 法拉第的进一步研究

从该世纪初以来，电和化学之间的关联一直引起人们极大的兴趣，法拉第也热衷于这个问题。在实验的基础上，他驳斥了戴维、冯·格罗杜斯和德拉里夫关于电流使电解质分解的理论，他认为，电流能够使分子产生分解并在液体中各处重新组合。

在研究过程中，1833年他使用了至今仍旧沿用的许多术语，如“电极”(阴极和阳极)；“电解质”；“离子”(阴离子和阳离子)等。另外，他还建立了以他的名字命名的定量的电解定律，其内容是：在一定时间内，单位电流所运送的任一元素的离子的重量和该元素的原子量与价数之比成比例。在经过一系列争论的基础上(象彼得·马克·罗热以前所做的那样)，他驳斥了伏打的电堆接触理论，而这些争论引起了对能量原理的注意。

1837年，法拉第根据处于不同电位的两电极之间电解质的分解，形成了对电介质特性的认识。由此，他给电介质这种特殊感生电容下了定义，并发现介电常数的大小对电容器容量和对两点电荷间相互作用力的影响。这样，库仑定律得到了如下的形式：

$$K=\frac{1}{\varepsilon}\cdot\frac{e_1 e_2}{r^2}$$

式中 ε为特殊感生电容或介电常数。他又一次应用戴维的观点，创立了电介质极化理论，并且成功地用电力线来表示静电现象。另外，他假设纵向张力作用于力线方向并相互排斥。他以极大的热忱发展和捍卫了这些思想。他坚决反对“电的超距作用”的观点(但在解释静电力时仍一般地接受了这一观点)，他对以相邻粒子的作用来替代超距作用这一事实给以很高的评价。从那时起，媒质效应在电学理论中起了很重要的作用。

人们对于磁与光的关系早已进行了推测。在研究这个问题的过程中，法拉第于1845年发现，当偏振光通过一块置于一电磁铁磁极之间的所谓重玻璃（这是他数年前制造的一种特制玻璃，主要成份为铅硅酸盐）时，偏振面旋转了，当光线沿磁力线通过时，偏振面的旋转角度最大。法拉第称之为光的磁化和磁力线发光（也称为法拉第效应)。当时还试图发现磁场对光的颜色的效应，但未能成功。

法拉第的最后一个发现是抗磁性，用的还是重玻璃。他将抗磁性和顺磁性进行比较后得出如下结论：磁力是所有物体（即不

仅是铁）都能产生的一种普遍的自然力。

实际上，在法拉第之前，安都昂·西塞·贝克勒尔和T·塞贝克就已经观察到了抗磁现象，但从未认识其基本原理。

## 法拉第理论的发展

我们肯定法拉第的工作在科学发展中的极大重要性和在物理学中的惊人贡献，我们还必须强调这种成就有一种缺陷，即完全缺乏与数学的联系。法拉第原来是个邮递员，他完全是通过自学成长起来的，他没有机会受到系统的数学训练，而这种数学训练是所有法国物理学家的巨大力量，凯尔文勋爵在此也受益非浅。因此，一个迫切的要求是建立法拉第物理理论的数学模型，并促使其进一步发展。苏格兰数学家和科学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦满足了这一要求。

他应用了在十九世纪中逐渐发展起来的叫做矢量分析的一个新的数学分支。为了其特殊用途，他作了充实和扩展。法拉第理论的基本原理，尤其是力线理论和电磁场能量存在于电介质和导体中的观点，现在用新的数学语言表达出来了。在这个过程中，法拉第的某些术语用其他术语代替了，如“电介质极化”变成了电介质位移，“极化变量”变成了位移电流等。在几个基本方程式的基础上，麦克斯韦建立了完整的电磁理论。因为这个理论是建立在法拉第思想基础上的，所以被称为法拉第-麦克斯韦理论。

从麦克斯韦方程组推导出，在能够产生介质位移的媒质中可以产生周期性位移波，这些波的传播速度与光波相等。这使得麦克斯韦产生了这样的设想，即分别起着光和电磁波运载者作用的两种共存媒质，实际上就是一种媒质。因此，光的电磁理论的基本原理可表示如下：光是自动传播的电磁强度平衡的周期性扰动。由于两个矢量场垂直于传播方向，故波的运动自然是横向的。这就消除了仍然坚持反对波动理论的主要异议。

麦克斯韦理论于1873年在他的重要著作《电和磁》中进行了

阐述。这引起了一场轰动，但也给读者设置了巨大的思想上的障碍。

对麦克斯韦理论的一个重要反对意见是，这个理论实际上未对光的反射和折射这样重要的现象作充分的解释。赫尔姆霍茨在原则上给出了弥补这一缺陷的方法。荷兰科学家亨德芬克·安土恩·洛伦茨于1875年在他的学术论文《论光的反射和折射》中作了数学推导。

除上面所讨论的法拉第效应外，还发现了另外两个现象，这两个现象一方面表明了电和磁之间的密切关系，另一方面也表明了电和光之间的密切关系，这就是苏格兰科学家约翰·克尔发现的磁光效应和电光效应。上述第一个现象是磁的反射端在反射时，偏振光的偏振面要产生旋转；而第二个现象是在电场作用下的某些电介质内会产生双折射，此时，这些电介质的特性犹如光轴平行电力线的单轴晶体。

但是，用实验有效地证明光的电磁理论的真实性，只是到了1887年才由德国物理学家亨利希·鲁道夫·赫兹实现。他发现用感应圈可产生电磁波，并能通过反射和干涉获得驻波。这些波的波节和波腹可通过特制的谐振腔来确定。反射和衍射也可用此来演示。可以证明，这些都服从相同的光学定律。

赫兹利用凯尔文勋爵在研究电容器放电时所推导出来的数学方程式作为他实验的理论基础，这方程式给出了一振荡回路的振荡周期与电容量和自感量的关系：

$$T=2\pi\sqrt{LC}$$

（式中T为振荡周期，L为自感量，C为电容量。）这样，我们就可以求得波长，并可使之足够小，以便在实验中进行测量。

1896年，荷兰物理学家彼得·塞曼给出了光与磁之间存在密切关系的新的实验证明。他用现代的分光设备（罗兰光栅）重作上述法拉第的研究，观察到钠光谱中的黄线变宽了（塞曼效应）。

查理·菲维埃兹于1885年就已观察到这个现象，但未引起注

意，可能是缺乏理论根据的缘故。1896年才证明这是一个极其重要的发现，它是以后极为广泛的、对现代原子理论的创立作出重要贡献的研究工作的序幕。这个效应立即成为亨·安·洛伦兹纯理论研究的课题。根据麦克斯韦所确定的路线，他提出了有关所谓电子理论的原子结构假设。他用这种结构解释了塞曼效应，预言了变宽谱线边沿的圆偏振，并证明，变宽的程度提供了一种能够确定所假设的电子荷质比的方法。这些预言后来都被塞曼用实验所证实。

洛伦兹发现，电子的荷质比比氢离子约大1000倍。根据这一结果，他预言有比原子还小的粒子存在。英国物理学家约·汤姆逊于1897年用阴极射线实验证实了这一点。最后确定了电子的质量为氢原子的$\frac{1}{1840}$。

我们看到，存在最小电量即“电原子”的想法，显然来自法拉第关于电解的观点。“电子”这一术语是1891年由G·约翰逊·斯通尼引入的。而精确地确定电子电荷的工作则是美国物理学家罗伯特·密立根完成的。

# 第二十四章

# 钢和电改变着世界

在过去一百三十年里，大量价格低廉、使用方便的钢铁和电力可能比以前技术史上的任何因素都更彻底地改变了西方世界的面貌。每个人在工作和家庭两方面可以利用的能量明显地增加。除蒸汽机外，其他一些能源如汽轮机、内燃机、水轮机及喷气发动机等使人类对自然资源的开发不断扩大范围，甚至于达到了这种程度：急于利用核能，唯恐其他能源枯竭，使以后几十年人们物质生活水平被迫降低。

## 工业革命

到1830年，蒸汽机已成为优异的机动能源，而依赖于巨大动力源的工业革命也随之蓬勃兴起。水轮和风车成为历史遗迹，蒸汽机的规格和输出功率迅速增大。热学和力学的迅速兴起，钢和其他优质材料的使用，成就惊人。到1880年，400马力的机组已是司空见惯，还建成为数不多的10,000至12,000马力的机组。蒸汽机作为新型机车的发动机，也取得很大成功。早在1858年，“伟大的东方号”发动机功率已经不小于3,410马力，它有助于蒸汽船击败快速帆船。但到十九世纪末，这类庞大的往复式蒸汽机容量已达到极限。

1899年纽约地下铁路建造了10,000马力蒸汽机

组，1902年被弃置，因为它高耸入云达40英尺，它不得不让位于新的竞争者——汽轮机，后者不仅经济性较高，而且体积只有蒸汽机的十分之一！其实，蒸汽机的经济性能已经大为提高。火焰管式锅炉已被水管式锅炉所取代，从而可使压力增至五十大气压。三级膨胀式蒸汽机把这类高压蒸汽机内可利用的热量更为充分地转变为功。此时，蒸汽机时代已经过去了。十九世纪它曾称雄一时，现在不得不让位于新的对手。其中最具有竞争力的证明是汽轮机——一种把矿物燃料的热能转变为有用功的更为适宜的形式。

十九世纪的工业革命建立在煤和铁或钢的基础上；由蒸汽机驱动的新型大功率机器促成过去由不同行会和企业完成的各项操作的集中化。拥有矿物燃料和铁矿自然资源的地区象磁石一样把工业集中起来。十九世纪欧洲人口增加二至三倍，同时人口集中于城镇；在1800年左右，许多欧洲国家的土地所有制特征严重丧失，到约1900年，英国人口的70%、德国人口的65%都居住在城镇和大城市内。这个工业化过程之所以可能实现是由于海外贸易蓬勃兴起，由于把新工业产品和机器换成原料和食物。就是在1900年，英国和德国的出口额组成中，制造商品不少于百分之七十五。但与现代化工厂相比，本世纪初的工厂规模仍然很小。确实，英国在1920年的煤产量大约为1800年的二十倍，而人口仅增加 $4\frac{1}{2}$ 倍，但在1900年左右仍有许多企业只有少数工人。

这一点在法国尤为明显。该国的煤和铁矿贮藏量较少，1900年有600,000个工业企业，其中百分之八十的企业只有四个工人或更少；当时法国使用的蒸汽机平均功率为30至35马力。比利时是当时高度工业化的国家之一，只有少数企业，其每一工人平均耗费的动力超过1马力，即使在美国，也只有少数工厂超过此数值（少数人使用的动力达5马力）。现代工厂能量的惊人消耗是采用其他原动机和能源形式的结果。

## 电的利用和输送

电力工业的崛起为这几种新原动机的发展铺平了道路。1850年前后，还不能指望电能成为通用能量形式。十八世纪对静电的研究已导致发现由“伏打电堆”和蓄电池产生电流的形式，其中一系列浸在化学溶液内的两种不同金属制成的极板把化学能转变为电能。早在1800年，尼可尔松和查列斯已运用这样的电流通过电解作用使水电离。不久，由丹尼尔（1836）、格洛夫（1839）和本生（1842）发明的一些著名的蓄电池投入市场，但它们都是一些微弱的能源。1808年戴维用2000个这样的电池产生电弧，1850年霍特计算出，电能要比蒸汽能贵25倍！

十九世纪下半叶，帕拉纳特（1859）发明了较好的蓄电池，他的发明经福尔和考伦斯加以改进，目前仍在汽车中使用。莫纳斯的莫利森首次尝试用这类蓄电池使汽车转动（1891），并在发电厂内用它们贮存电能，以备峰值负载之需（1896）。但即使爱迪生也无法将其转变成廉价的供能器。

电的本性适于作为能量传输的手段。发电站把能量转变为电，然后远距离输送至他处，再把电变成能量。当科学阐明了奥斯特的奇妙实验（182θ）（该实验指出电流对邻近指南针所产生的作用）时，电的这种本性就被揭示出来了。阿拉贡、安培和斯杜尔吉研究了这门“电磁学”，约瑟夫·亨利在1831年设计了第一台电动机，发现了“降压”和“升压”变压器的原理，他甚至还演示了一台沿一英里长的金属线发送信号的电报装置。遗憾的是，他的发现长期未引起注意。

同年，法拉第对磁铁在线圈中向内外移动时产生的感应电流的研究取得更大成就。他制成一个在马蹄形磁铁的磁场间旋转的12寸铜盘。由轴上引出的一根金属丝和擦着圆盘边缘的电刷引出的另一根金属丝形成电路，可证明在电路内有感应电流。1832年4月在皇家协会公开进行的这些实验曾轰动一时。当一个参观者

问及法拉第，这种新玩意有何用处时，他恰如其分地反问："新生婴儿有何用处？"因为很快就得到证实，这个婴儿具有强大的生命力。它包含把机械能转变为电流的发电机原理以及把电流再转变为机械能的电动机原理。

最早的发电机所产生的是交流电，因此不能代替蓄电池。斯杜尔吉的"联合直接充电器"（1834）和惠斯顿的多极电枢使发电机可以产生连续的直流电。其他一些发明家改进了电磁铁（伍列希、赫斯）、电枢（西门子、帕克诺提、惠斯顿）和其余部件。1867年大型巴黎展览会上展出实用的发电机；大约就在那时，"发电机"一词开始为人们所知晓。此后不久，产生直流电和交流电的发电机被用于电镀，但主要用于街道照明电弧灯（1875）。在同一时期，由但维朴特（1835）、帕克诺提、格拉姆（1873）、斯泼拉卡（1884）等人研制了电动机。

大约与此同时，对于直流电和交流电的相对优点展开了热烈的讨论。早期的工程师们致力于生产直流电，为数量不多的电动机供电或作小范围照明之用。但由于对电力的需求增加，并且电力生产远离用户，因而就出现了电的输送问题。如果作低电压远距离输送，则必然会出现电能的大量损耗。因而必须在发电站把电压升高，并在输送到用户地区后用变压器重新把电压降低，供电器安全而经济地使用。在这方面，直流电有明显的缺陷。因为对交流电的变压和输送要比直流电容易得多。适宜的变压器可将400伏三相电源升至132,000伏，通过细铜电缆输送几百里，再把它降低到400伏，如果需要，其中三根240伏的单相电源线还可供一般家庭照明用。在远距离输电中，开始逐步采用5 00,000 伏高压。

## 新的发电站

在设计良好的交流发电机方面没有发生特殊困难。变压器尚处于摇篮时代，但德普赖斯、卡帕提亚、卡拉特、吉普斯、惠斯

汀豪斯等人在1880—1890年间设计并制成第一批实用变压器。那个时代的典型“电蜡烛”——电弧灯，是由伯路希、雅伯洛赫考夫（1876）和韦斯通（1877）研制的，当时爱迪生的许多发明有助于电力的适宜生产和分配。

1878年有16支雅伯洛赫考夫蜡烛① 安装在巴黎歌剧院附近。一年后，美国第一家出售电力的公司——加利福尼亚电照明公司安装了伯路希发电机为电弧照明供电。1880年纽约也成立了电力公司，因为研制了电灯泡，所以电力照明进展迅速。1882年爱迪生创建纽约爱迪生电照明公司珍珠街电灯厂，该厂对800只电灯供电。在十四个月内，电灯数增加至12,732，同时爱迪生还发明了供用户使用的电表。第一家水力发电厂于1882年在威斯康星的阿帕兰顿开始发电。四年后，布法罗成为第一座拥有交流发电厂的城市，它大规模地为电灯和动力供电。

从此以后直至1910年，对电的各种新用途进行了大量的实验和研究。它们促进了电力网的建立和大量电力的生产，从而降低了电力的单价。1890年英国第一所发电站建立于德普特福德，同时第一条地下铁道开始运行。从1890年起趋向于废弃小型电站，而采用大型发电设备，例如建设新型水电站对各城市和全国供电。建于尼亚加拉瀑布的大型电站在1896年首先将电力输送至布法罗。

最早的一批发电厂主要是提供照明用电。但在若干场合已经指示出一些新的用途。1883年维也纳博览会实际上已经展出所有现代化的用途，例如电炉、平锅、缓冲器及印刷品。最早的刷地毯器可追溯到1865年，应用离心器原理的洗碟机在1865年制成，第一批洗衣机在1869年出售。1893年的芝加哥世界展览会与电的迅速运用关系极大。这取决于对每户家庭提供廉价的电源以及更加经济地运用电厂的发电能力。因为电弧灯和灯泡每天只在一部

---

① 此处指电蜡烛。——译者注

分时间用电，最早一批发电厂的平均负荷只是它们峰值负荷的百分之十。1910年后，电力牵引和动力占用大部分电力，对有轨电车、地下铁路和电动机的供电消除了电站的不稳定负荷，从而使电站开始有规律地经济地运行。在1910年至1920年间，电被公认为一种重要的能源形式；1920年后，由于水力发电站的发展和电力在工业中，例如在特种钢和铝冶炼业、碳化物及其他化学制品生产部门的应用，使电力的消耗量稳步上升。

在美国这样一个年轻的国家里，电气化的速度比许多欧洲国家为快，那些国家的热源和能源取自煤、煤气和石油，它们的供应在电力出现之前已经有了良好的组织，因而在那里电力遇到剧烈的竞争。尽管如此，英国在1906年的耗电量仍达1,000,000瓦，约三十年后，增至四倍，电力单价降至1906年的十分之一。在水力发电资源丰富的一些国家，如斯堪的那维亚、意大利和瑞士，电力发展更快。1900年美国所消耗电能的百分之三至四系供电动机使用，到1940年增加到百分之七；在欧洲，1920年前电动机尚未引起人们的重视。

## 电力促进通讯

1880年前后良好的发电机和电动机已可供使用，十九世纪末开始大规模商业化生产。但电还起到其他一些作用。往昔的电弧灯被白炽灯所取代。早在1820年，德拉鲁已证明电流能使铂丝圈发光。以后继续对较廉价的材料进行研究，其结果是由斯旺和爱迪生彼此独立地发现的。1860年斯旺开始用U形碳化纸片作为真空灯内的灯丝进行实验。1879年爱迪生研究成功较完善的铂丝灯和一个用棉花或布利斯顿尔纸板做灯丝的灯泡。第一批这样的电灯安装在“哥伦比亚”号蒸汽船舷上。1880年爱迪生开始用竹子制做灯丝。这类灯的寿命很短，仍受到电弧灯的剧烈竞争。但从1885年起制成了较为完善的灯丝并从此决定了电弧灯的命运。1891年菲利浦开始在荷兰大量生产白炽灯，以后又研制成许多不

同型式的灯，如气体放电灯、钠灯、水银蒸汽灯和摄影闪光灯。在冯·博尔顿和韦尔斯巴哈成功地制取可延展的钽金属（1897）后，金属丝灯获得了成功，以后贾斯特和赫耐曼研制了钨丝灯（1903）。

自从格洛特取得第一项电报专利（1800）后，许多人致力于研究电信号的远距离传送。不论是索姆林（1809）还是韦伯和高斯（1834）都没有成功地使这类信息输送距离超过几英里。1836年塞缪尔·莫尔斯用旧画架制成他的第一台电报机，并于1840年取得“电报号码”专利。又经过七年实验，他说服国会（1843）花3万美元建立了第一条华盛顿和巴尔的摩之间的电报线路。1844年5月24日他发出第一封电报：“上帝创造了什么！”但电报的应用遇到了另一类困难。1849年南肯塔基的电报线被毁，“因为它掠夺空气中的电，妨碍降雨，并且自从架设电报线以来，没有一次好收成！”

用杜仲胶做电缆绝缘材料（1847），为制造优质电缆开辟了途径。大西洋电报公司开设于1856年，在连接东半球和美洲大陆的两根电缆作为第一个国际电报电缆网之前，约十年时间内曾不断发生事故。

1821年惠斯顿曾试图建立人声远距离传送器，他称之为“电话”，在雷斯（1863）和伯利诺（1876）等先驱部分成就的基础上，贝尔通过自1871年起的实验，用电话把第一句完整的语言传给他的助手：“华特逊先生，到这儿来，我需要你。”不久，贝尔电话公司与西方联合电话公司关于1876年的贝尔专利发生争议，但西方联合电话公司在1879年撤出这场争斗。1877年第一条新闻电讯发送至创设公用电话的波士顿《环球报》，1884年纽约和波士顿之间的第一条电话线对公众开放，接着纽约至费城（1886）和纽约芝加哥线路（1892）相继开放。到1880年已有50,000个美国人在自己的家庭或办公室内安设电话，到1929年此数增至20,000,000，伦敦的第一座电话交换台创立于1879年。

由于两项重要发明使声音可以远距离传送：普宾的“超前线圈”和弗莱明及德福莱斯特的放大器或真空管。它们也是无线电的组成部分。自动交换台（1892）和地下电缆（1906）促进了电话的应用，因为贝尔系统（1918）许可用一套电线传送几种信息。从1931年起，可以对东印度群岛、夏威夷和加那利群岛提供跨越大洋的电话服务。

## 汽轮机和水轮机

电的应用为消息的传播开辟了新的途径，如无线电和电视。但在十九世纪，电力生产仍是个紧迫问题。数学家和工程师们对水轮进行计算并予以改进后，出现了水轮机。欧拉、富纽伦、乔瓦尔等人的努力有了实际效果：十八世纪六十年代，一个格里勃尔（法国）的造纸工人伯格斯开始应用高山上的水推动水轮机。不久，这种所谓“白色的煤”就在瑞士、英国和美国用于驱动发电机。在水力丰富的国家，水轮机驱动发电机的发电站，提供了廉价的电力。阿尔卑斯山脉的水力发电能对整个意大利北部、法国甚至更远的地区供电。这些廉价的电源促使燃煤的热电站提高效率，从1900年至1930年提高了 3 倍。虽然早在1911年法国的水力发电厂发电能力已达500,000马力，但这类能源受自然条件的限制，因而它们有价值的贡献并未解决全部能源问题。

汽轮机可称之为“用蒸汽驱动的风车”，已经证实这是把蒸汽能转变为动力的一种更为经济的形式。从亚历山大里亚的希罗开始，发明家们一直试图掌握它，德·拉瓦尔（1884）制成一台虽小但却是成功的汽轮机，他运用自己发明的高速斜齿轮(1890)把汽轮机变为低速发电机和泵所使用的高效原动机。1884年帕森斯制成第一台实用汽轮机，以后由于柯蒂斯（1898）的速度复合机构，使汽轮机外形尺寸缩小。第一台供发电站用的帕森斯汽轮机在1888年安装于纽卡斯尔，可产生75瓩交流电。1897年帕森斯装设了具有三台汽轮机的“透平机组”，它的高速和灵便使全世

界震惊。这次展示加速了在海军舰只和商船中运用汽轮机。

在这些船只中，汽轮机直接推动螺旋桨，而帕森斯的减速齿轮机构（1910）扩大了有齿轮传动的汽轮机的用途。1903年一台立式5,000瓩柯蒂斯汽轮机安装于芝加哥国库街发电站，它在很长时间内是最大的同类型发电装置。1902年汽轮机的平均功率为300马力，而蒸汽机的平均功率则为500马力。但发电站和工厂里的汽轮机很快就变得很大。这时，已经可以使用100个大气压（550℃蒸汽）的蒸汽，1933年的汽轮机已能产生两倍于1910年燃煤发电装置的能量，比纽可门蒸汽机大40至50倍。

燃气轮机是汽轮机的变型，具有悠久的历史。早在1791年，约翰·巴德已取得一项燃气轮机专利，但最初实用燃气轮机是由兰玛和阿尔曼加特（1905）、赫兹华茨和考汀（1908）设计的。它们的应用约始于1933年，弗兰克·惠特尔在1941年成功地将燃气轮机用于飞机推进器。

这些发动机和电动机一起构成我们机械时代的支柱，驱动着工厂和所有机器。经改进的链传动和齿轮传动使动力传递更趋完善，但皮带和绳索传动提供了更为灵便的传动形式。复合绳索传动是詹姆士·考姆勃（1856）引入的。1893年弗里德里克·温斯罗·泰罗发表了他关于动力传递的辉煌研究成果，使我们对传动问题的观点发生彻底变革。对于摩擦问题的研究更为深入，较为合理的润滑方式在1880年前后引入。古代人已经知道一种原始的滚珠轴承，但从1869年起，才在自行车中采用杯状和锥状滚珠轴承。滚柱轴承是在1910年前后采用的。

## 钢以及新型合金和金属

如果没有钢、铝和其他合金，就不会有机械时代。1850年前后，钢的大量生产是一个迫在眉睫的问题，这时熟铁和铸铁作为结构材料的严重缺陷日益显露。当时英国的生铁产量为3,000,000吨，而钢只有40,000吨，它仍是一种特殊产品，价格为铁的五

倍。用生铁大量生产钢的方法是由两位发明家独立提出来的。

1862年威廉·凯利在威尔士炼铁厂宾夕法尼亚安设一台他的“炼铁转炉”，但在他之前亨利·贝塞麦爵士于1855和1856年已取得专利。贝塞麦提出下列设想：对熔融的生铁鼓风使杂质氧化，并由此氧化过程加热铁水以产生液态熟铁或钢。法国在1858年采用首批转炉，过了几年，它们就能在25分钟内生产二十吨液态钢，从而可制成大型坚固厚实的钢铸件。以后又用几年时间改进这一方法，美国发明家霍莱交替使用两台转炉使钢的浇注过程连续化。它取代了搅炼法，但以后它似乎还要让位于西门子-马丁的平炉炼钢法。

贝塞麦炼钢法是一种“酸性过程”，限于含磷、硫量少的铁矿石的转化。鉴于此类矿石稀少，托马斯和吉尔克利斯特(1877)提出用碱性材料例如白云石制成的砖作为转炉的炉衬，并使磷与熔渣相结合。这种低碳钢的“碱性”过程使得采用萨尔地区铁矿石的法国和德国以及拥有相似矿石的比利时大受裨益。

马丁和李查特利成功地用煤气和空气把反射炉加热至高温，而煤气和空气则用排出的燃气预热。这样他就用这种反射炉成功地炼成了钢。这类炉以后用高级硅砖作炉衬，从此西门子-马丁平炉（1873）开始生产低碳钢。用这种方法炼的钢约占87%，转炉钢占4%，有10%是用电炉生产的。碱性平炉炼钢法是波塞尔和凡尔兰（1879）发明的。在1856到1870年间，钢价下降百分之五十，钢产量上升百分之六十。钢轨的寿命比二十条铁轨寿命还长，到1863年，第一艘钢结构轮船和第一台钢结构机车都已问世。

雷奥米尔对于钢铁生产进行控制的试验研究由索比（1857—1864）、奥斯蒙特和李查特利继续进行。后者创立了金相学，使过程的控制十分精确。钢与某些不甚熟知的金属合金化，产生具有优异质量的特种钢，这时钢内可含有钨（莫谢特，1845）、铬（布鲁斯特莱，1878）、镍（马比，1883）、锰（哈特菲尔德，

1882）和钒（1914）。自从克尔克（1879）应用电弧熔化钢和铁后，电能开始被用于加热冶炼炉。亨利·摩森（1892）使这种方法的效率大为提高。十九世纪九十年代末，弗莱蒂采用感应炉，藉助于电磁场的迅速变化在金属内部所产生的涡流对金属加热。这类电炉的炉温可达3,000℃，并且可在某些气体参与下使金属熔化。这样，用感应电炉生产的钢大规模地取代了坩埚钢。

电也使得容易氧化的金属如铝（霍尔，1886）和镁的大规模生产成为可能。这些金属的轻合金对于飞机的发展至关重要。原先把铁片浸入熔融锌内（霍伯森，1805）生产马口铁，以后又有镀锡铁皮的生产方法；在一个时期内，也把薄的低碳钢片用作“马口铁”使用，虽然锡罐已广泛用作大量生产的食品和液体的容器。对腐蚀的研究导致模仿古代渗碳方法生产镀铝或锌的铁板（查尔帕，1913）。

## 蒸汽机在前进

1800年前后，有几位发明家曾试图用蒸汽机驱动车辆，但库纳（1769）、默多克（1785）、特列维希克（1801）、伊凡斯（1804）等人的努力都归于失败；尽管古尼和亨考克成功地建立了蒸汽马车服务机构（1830—1831），但这种笨重的车辆消耗燃料过多，并严重地损坏路面。看来较有希望的是应用从十六世纪起就已经在矿山普及的路轨，1767年，这类路轨用铸铁制成，可承受由人或马匹牵拉载有矿石的车辆。以后这类路轨用熟铁制成，直到人们发现贝塞麦钢是一种较优良的钢材为止。

1804年特列维希克建成第一台蒸汽驱动的机车，但最后的成功是乔治·史蒂文逊在1813至1829年间研制了通用发动机，他的“火箭号”机车在1829年的雨坡试验中取得全胜。第一条公用铁路连接斯托克和达林敦（1825）。史蒂文逊和雷尼在1830年开设了第一家机车工厂。

1825至1840年间在欧洲许多国家及美国铺设了铁路线。同时

铁路的技术装备有所改进。最早的卧车（1839）由乔治·普尔曼（1858）加以改进；餐车出现于1879年的英国；从头到尾有走廊的列车出现于1890年。压道车设有摆动转向架（1874），连接着驱动轮和空气制动器（1869）。良好的信号系统，例如闭锁信号装置在1854年投入使用，1875年塞克斯发明了他的“联锁及闭锁”系统，自动信号装置于1893年在利物浦投入使用。

到1890年，由于铁路的进步，开发了密西西比河以西的广大平原和山区，加拿大的蒙特利尔和渥哥华已用铁路连通。由于有廉价的电力可供使用，铁路得以实现电气化。第一条全部电力牵引线路在1883年于爱尔兰的普特鲁斯开始运行，二十年后，美国首次出现用电力机车牵引的货车。从二十世纪初起，铁路的电气化迅速展开。

## 公路运输的机械化

十八世纪下半叶，对坐乘马车和货运马车的结构已经比较重视，当时公路运输正在迅速发展，英国和大陆上主要城镇间也开始设置公共马车。陆地旅行受惠于较为良好的道路，因而比罗马帝国时代更为迅速和方便。单马双轮轻便马车（1820）和出租双轮双座马车（1834）均已采用，公共马车从1829年起出现于法国，早期的“有顶座公共马车”继之被“单层座”公共马车（1890）所代替。随着内燃机的发展，开始使用机动乘客车辆。

有轨车辆较早使用于德国（1832）和法国（巴黎，1855）等国家。这些国家在一段时间内没有建立阻碍有轨车辆应用的公共汽车系统。马拉有轨电车六十年代出现于美国中部地区，在1890年前后它们实现了电气化。

十九世纪的另一种新型车辆是自行车。实际上很早以前就有几种“踏板车”；可见于希腊墓碑上。锡拉克设计了一种四轮车，由一仆人踩两踏板驱动（1780）。但由乘车人的双脚接触地面而推动的第一辆真正自行车始于1780年，查理士·冯·达拉斯·

达沙勃鲁（1818）把它改进成为“轻型轨道车”或“二轮小车”。麦克米伦设计了一种更为先进的形式，其中两块踏板通过曲柄使后轮转动（1840）。拉兰孟特的无橡胶胎的旧式车（1865）在前轮上有两块踏板，以后发展为“廉价旧式车”。

经过改进的钢材使之有可能制成较好的车架和其他零件。梅狄森采用空心钢管架和有辐条的车轮(1867)，不久后市场上就出现具有链传动后轮的劳森“安全自行车”，劳弗厂在1885年开始生产此种车辆。切向辐条车轮、充气自行车胎(达姆劳普，1889)和滚珠轴承（1877）促成现代自行车的研制。

汽车的进步与优质钢和燃料有关。汽车出现于石油工业崛起之后，当时石油炼制设备表明，轻汽油馏分是新型内燃发动机的优质燃料。汽油发动机是兰蓬（1799）、达罗怡斯、雷诺和奥托等人曾经研制的早期煤气发动机的后继者。1882年达姆勒和梅巴赫建立了他们的第一台汽油发动机，1886年把它安装在四轮车架上，形成第一辆汽车。与此同时，本茨也制成一辆三轮汽车，它具有较轻的钢车架。查理士·杜瑞阿于1891年建成第一辆美国汽车（hourseless carriages）。

这些早期的汽车形式仍来源于马车，但到1901年，达姆勒则建造了第一辆麦塞兹低车体汽车,罗尔·洛埃斯立即仿效(1904)。波胥的低压磁石发电机和火花塞、蜂窝式水箱以及优质车轮和轮胎结构促成了这些早期汽车的改进。

在1899和1901年间，奥帕尔、霍奇、阿达勒和帕罗托斯等工厂均试图大量生产汽车，但亨利·福特汽车公司的工厂取得了更大成功(1903)。研究结果很快使汽油机的重量功率比由4.5磅/马力（1900）降为1.1磅／马力（1950），它对公路和空中交通甚至农场劳动的机械化贡献极大。仅在英国和威尔士，农场的能源由1908年的1,000,000马力上升至1948年的5,500,000马力，因而所需的劳动量减少百分之七十五，马匹在能源中的比重由百分之八十七降为百分之七。1894年初次制成的柴油机与汽油机一

起成为陆上和海洋交通普遍使用的发动机，因为柴油机的效率高于蒸汽机，所以这时在发电厂内经常建造10,000瓩（以及更大的）大型发电机组。

## 现代化交通的新型道路

桥梁和道路学校的工程师们通过努力工作使法国采用了考梯（1720）和特兰沙古特（1775）系统的新型道路，他们在石块路基上修筑夯实的碎石子路。桥梁及道路学校的工程师们采用马拉铸铁滚子(德赛沙特，1787)修路，法国在大革命前就拥有12,000英里路面良好的道路，此数超过其他任何欧洲国家。

英国的道路修筑和维护委托给修路托拉斯，它们从通过税中筹措此项资金。1760至1774年间，议会通过的修路法令有452项之多。邮车和运送新工业产品的货车要求有较好的道路。1760至1820年间的各项技术发展有助于新式车轮和车辆的制造，但更为根本的问题是修筑良好的道路。这类道路是由约翰·麦克耳夫、帕纳尔、埃治华斯和麦卡达等先驱修筑的。他们认为石块路基是不必要的。他们用砂砾、石片和土修路。1815年后，“水凝碎石路”占据主要地位，它适用于大多数大陆上的“国家公路”，拿破仑已开始为其军队修筑这类道路。1840年起筑路事业有过短暂的萧条，但一旦人们认识到铁路和公路各司其职，公路修筑又迅速兴起。

1820至1850年间粉末状含沥青石灰石的价值为人们所认识，它可用柏油稀释，铺于路面加以热修平。三十年代巴黎的许多大路都铺上沥青，同时还发现热的粉末状天然沥青本身可以用滚子压成良好的路面（1837）。这引起压路机的迅速发展，蒸汽驱动的压路机约出现于1860年。预先覆盖焦油或含沥青石片的新道路结构被用于“柏油”路和“沥青碎石路”，德·斯曼特和理查德森设计了用碎石片、砂子和用热沥青预先搅拌的填料构成的水密路面(1870—1890)。十九世纪末，当汽车行驶在公路上面时，原

有的碎石路受轮胎的吸附造成整个欧洲尘土弥漫。古格里密特用热沥青对这类道路作了路面处理（1901）。

1844年约翰逊首次制成人造硬水泥，它远优于煅炼的熟石灰和泥土的混合物，阿斯帕丁称之为“波特兰水泥”（1824），筑路工程师们很快就认识到这种新材料对道路修筑的价值。1865年起苏格兰出现由石子和水泥筑成的混凝土公路，但在1885年前后才开始取得真正的成功。新型撒布机和搅拌机都已设计出来，它们促使四十年后混凝土道路的普遍化。

## 桥梁和运河

内陆船运是工业革命的另一新特征，许多桥梁和运河都是这个时期修筑的。桥梁和道路学校的著名工程师们如潘纳特已在法国设计并建成许多新的桥梁。先进沉箱的发明(1790)使工程师们即使在河心也能建成牢固的桥墩，并使他们能作出比过去工程师们更为大胆的设计。在英国，泰尔福特设计了一座有三个椭圆形桥拱的塞汶桥，但不论是他还是他的同胞们的设计都是以经验为依据而不是以强度理论的计算为依据。

瑞士的格鲁本曼兄弟和中欧其他人所建的许多木结构有孔桥亦是如此。

美国工程师试图消除上述桥梁作用于桥墩上的水平推力，伊塞尔·汤在1820年取得第一座“格构桁架”桥的专利，这类桥是现代设计的前驱。赫维的“专利桁架”（1840）系采用熟铁竖杆，它是旧式木桥和新式钢桥之间的联系环节。随着应用力学的发展和铸铁、熟铁、钢及钢筋混凝土等新材料的应用，这些桥很快就超过石拱桥的400尺极限，悉尼桥钢拱的跨度为1,650尺。1840年左右，铸铁为熟铁所取代，管式熟铁梁由史蒂文逊用于霍利赫德的布列塔尼亚桥。十年后建成一些钢桥。洛勃林斯建成一些著名的吊桥，如布鲁克林桥（1867—1883）。而现代悬臂桥，其中最早一个例子是福斯河口桥，跨度可达3,000尺！

运河有助于连接“河流上游”的内地制造业城镇和位于通航河口的城镇。河口城镇变成新的海港，它们促进海上和内地贸易的发展。但大多数水路只能行驶浅驳船。因此，一些先驱者如布里奇沃特公爵用运河连接工业城镇和海港。大运河、沃尔弗汉普顿运河等把货物从内地转运到利物浦、布里斯托尔和赫尔。此项运河规划起始于约1790年，它激励美国工程师们修筑如克林顿运河（以后称伊利运河）、联合运河等著名的运河。到1837年前后铁路使运河的发展停顿时，已经修筑了4,500英里长的运河。十九世纪初还修筑了连接哥特堡和斯德哥尔摩的特罗尔黑坦运河，以及圣彼得堡海峡和伏尔加河之间、顿河和伏尔加河之间的运河。运费大幅度下降；从利物浦至内地的陶器货运价由每吨 2 英镑10先令降为13先令 4 便士。驮马已经消失，因为这时一匹马就能牵拉载重四十吨麦子的驳船。

## 新型船用发动机

由于制图学的兴起以及较完善的航行仪器如六分仪（1731）和哈里森精密计时器（1735）的使用，使船运受益非浅。十八世纪英国商船的外型尺寸增加一倍，从1790年至1820年间又增大一倍。发明家们自然想用蒸汽机推动船只，但巴宾等人的早期努力均告失败，直到十九世纪才取得了较大成功。1807年罗伯特·富尔顿和桨轮汽船在哈得逊河逆流行驶150英里。在英国北部，汽船作为拖船和货船加以使用。亨利·贝尔的客轮从1812年起定期航行于克莱德湾。1816年一艘荷兰船只用蒸汽动力从鹿特丹横渡至库拉索。

装有辅助蒸汽动力的“萨凡纳”号船于1819年 5 月22日起用29天首次横渡大西洋抵达利物浦，两年后卡拉斯号邮船开始定期航行。所有上述早期的船只都是蒸汽驱动的桨轮船，它们耗用很多燃料。高压蒸汽机、螺旋桨推进器以及合理的设计确立了汽船的霸权地位。螺旋桨推动的“阿基米德”号的试航（1839）显示

了它的质量优异。“大不列颠”号是第一艘横渡大西洋（1839）的螺旋桨汽船，到1850年，桨轮汽船已在海洋航行中消失。

帆船为获得制海权作了最后努力。外形美观的装帆流线型加利福尼亚快速帆船和中国快速帆船连同它们著名的“茶叶”和“羊毛”在为将要失去的事业而奋斗。1870年全世界吨位的百分之三十六是汽船，1900年为百分之六十二。钢结构船这时已经普及，劳埃德船舶年鉴（1834）对于较为先进和安全的船只建造起着促进作用。蒸汽船吨位很快增至30,000吨(“毛里塔尼亚”号，1907),甚至更大。远洋航行中出现的双螺旋桨汽船，尤其是油船、拖船和蒸汽驳船，已经确立自己的地位。帕森斯在1894年建造了第一艘涡轮机推动的船只；1905年双涡轮机驱动的班船下水。第一艘柴油发电机船只“芙珀塞尔”号建造于1936年。灯塔、港口设施、起重机及大型通航运河如苏伊士运河和巴拿马运河，都是由远洋航行船舶的数量和吨位增大而促成的。

# 第二十五章

# 新化学

虽然耗费了大约五十年时间去证明由道尔顿及其同时代人所提出的原子—分子理论的正确性，虽然元素的原子量的校正及化合物分子式的表达一片混乱，但是由拉瓦锡所创立的新化学的进步是不能否认的。这一时期重要的发展之一是有机化学的建立。

## 有机化学

过去几代化学家们已致力于研究和分析诸如矿物、矿石、粘土等“无机”化合物，但他们不时想到制备由生物体合成和产生的有机化合物，且大都相信，动物和植物具有某种“活力”，使它们能够用取自空气、盐或食物的化学物品造成有机化合物。早期的化学家们已制成乙醚，1826年亨利·亨内尔合成乙醇，其方法是在硫酸内吸收乙烯，然后再对这种溶液加以蒸馏。但乙醇被认为是一种不确切的例子。1828年弗里德里希·维勒(1800—1882)宣布，氰酸铵受热时转变为尿素，到那时为止人们仅知道它是动物尿中出现的新陈代谢产物。

维勒立即把他的发现报告伯齐利乌斯，后者挖苦地回答说，谁只要一踏上以尿取得不朽名望的道路，必然走进死胡同。伯齐利乌斯说，维勒用以制取氰酸铵的原料不过是生命体的某种副产品。但其

他一些人信任维勒，赫尔曼·柯尔贝(1818—1884)在1845年宣布藉助阳光的照射，用碳、硫磺和水可以合成醋酸。

分析有机化合物用的工具已由许多化学家先后制造出来，其中包括拉瓦锡、盖-吕萨克、泰纳（1810）、伯齐利乌斯(1815)、杜马（1830）和李比希（1831),他们实现了使少量有机化合物燃烧，再根据不同化学制品内吸收的不同燃烧气体以测定有机物质内碳、氢、氮和硫的百分比。氧的含量通常是从100中减去这些百分比的总和求得，虽然十九世纪晚期已经拟定了含氧量的直接测定法。这些方法证明，大多数有机化合物是由碳、氢和氧组成的，其中还有少量的硫和氮。如此多种多样的化合物是怎样由很少的“砖”砌成的呢？

1815年路易斯·约瑟夫·盖-吕萨克已经指出，氢氰酸可以看成是一组CN元素的氢化合物，他把CN称为“基团”，此基团在许多反应中，由一种化合物至另一种化合物时基团保持不变。李比希和维勒(1832)辨认出另一种基团“苯酰”(用经验式$C_7H_5O$表示),它的氢化合物是苦杏仁油。在制备原始杏仁油的氯化物或氰化物时，此基团不变。李比希（1834）指出，在普通的酒精和乙醚中都有“乙基”这个基团，杜马和帕利高特于同年在甲烷和木醇中都认出有“甲苯”基团。因此，如果人们能辨认基团或原子团（具有某种恒定的特征),就能理解有机化合物的多样性。对于这些基团的探索大大有助于了解许多有机化合物的组成。

最初，伯齐利乌斯以巨大热情接受李比希和维勒发现的消息，因为这些发现结果似乎适合他的二元论。但当他发现新的观点不与他自己的理论相适应时，立即对此结论展开激烈的辩论。他不能接受“带负电”的氧会形成带正电的基团的一部分这一说法。在伯齐利乌斯学派和“化合物基团”理论信奉者之间的剧烈争论无助于澄清事实真相，尤其是因为这时原子量尚未测定，并且对于一种基团经常提出不同的分子式。

1834年杜马通过研究用氯漂白的蜡烛产生的焦烟，发现氯、

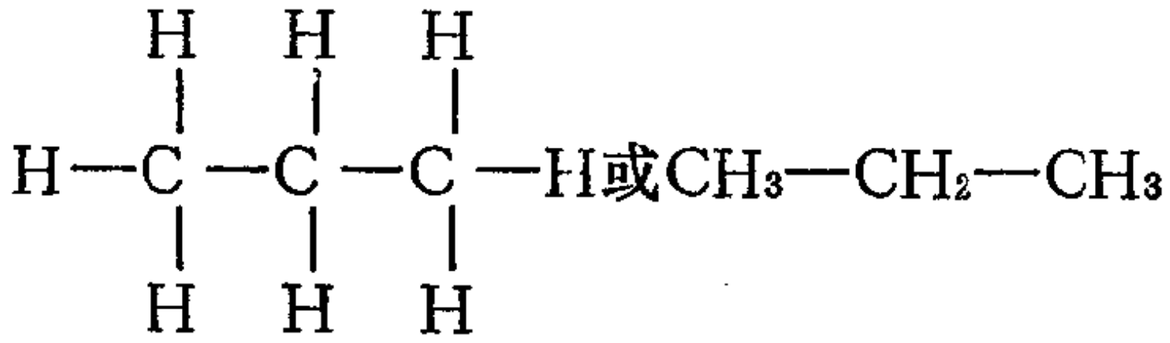
溴、碘具有从某些化合物中吸收氧的能力，并且是按一个一个体积或一个一个原子取代的。这种新的取代学说（实际上是一组经验规律）是杜马和他的学生们发现的，他们完全驳倒了电化二元论。奥古斯丁·罗朗提出所谓核学说（1836），它实际上是过去基团学说的变种，因为它认为，从某一种有机化合物出发，通过原子的取代可以产生全部由一个不变的原子“核”连接的一系列化合物。杜马坚持一元论，他在“类型论”中提出，“每种化合物都形成完整的整体，因而不可能由两部分组成。它的化学性质直接取决于其原子的排列和数目，而较少取决于这些原子的化学本性。”

## 结构式

所有上述理论及以后热拉尔的“新类型论”（1852）和威廉森及奥特林的“多重类型论”（1855）都是为了统一有机化合物的分子式，并对当量、分子和原子加以区别。因为已经发现了一些使人十分迷惑不解的事实。1823年李比希发现雷酸银和氰酸银具有相同的组成百分比，但它们的性质完全不同。伯齐利乌斯在1830年对丁烯（法拉第在1825年发现的）和乙烯以及外消旋酒石酸的研究结果也与此相似。他称这些化合物为同分异构体；凡是一个分子的重量为另一个分子几倍的，他称之为“聚合物”。以后用“同系列”加以解释，如热拉尔在1845年指出，某些化合物如乙醇、碳烃或脂肪酸，都可以排列成这样的系列，其中每个化合物分子较后面化合物分子多含一个碳原子和两个氢原子。

仅有化合物的百分比式，这类问题仍然十分模糊，只有指明真正的结构才行。1853年爱德华·弗兰克兰爵士在研究了含氮、磷、锑和砷的有机化合物后得出结论，“互相吸引的元素结合能力通常是由相同的原子数得到满足的。”他的化合力或化合价可变但有限的假说成为凯库勒和库珀研究工作中的重要工具。库珀在著名的论文“论新化学理论”中建议用图式表示化合物的结构，原

子的化合价用线表示（按需要标成单价、两价或三价）。凯库勒独立地断定碳是四价，它成为有机化学的中心原则。原子量问题在卡尔斯鲁厄的化学会议上（1860）已经解决，会上散发了康尼查罗1858年的论文。这时就有可能确定分子式并用图示出。这样，如果写成结构式或稍后采用的构造式，丙烷就变成



凯库勒证实，这种图式可以很清楚地表示同系列有机化合物关系，以及原来的一个氢原子是如何被氯或其他原子团取代的。同分异构现象可以清晰地予以表示，在这方面所进行的讨论取得丰硕的成果。凯库勒根据分析资料指出，在某些情况下，相邻碳原子间存在着“二价”或“三价”键，且某些化合物具有碳原子“环”，例如众所周知的苯（$C_6H_6$）（1865）。由于各种疑难问题得到适当的解决，于是人们清楚地认识到有机化学是碳化合物的化学（热拉尔）。

## 立体化学

某些晶体对光线产生影响，因此，当光线穿过一晶体时，如果两者成一定角度，则光线仅通过一秒。这种现象从十七世纪起已为人们知晓，这时把其作为光的偏振（把光波的振动限定于一个平面）来认识，但仅用十九世纪的波动学说加以解释。路易斯·巴斯德（1848）在一篇光辉的文献中论证了结晶物质酒石酸和酒石酸盐的光活性是一种分子性质。他指出无光活性的外消旋盐可以分成等量的光活性对映体。他把结晶形式看作内部结构的表观现象，从而得出结论：两种活性的酒石酸的区别在于它们的分子结构不同，它们必然是不可重合的镜象。这一“分子对称”原理对于理解许多问题都很奏效。1872年维斯里辛努发现两种乳

酸，其中只有一种是光活性的。这只能用假定它们的原子在空间排列不同来解释。

1874年勒·贝尔和范特·霍夫彼此独立地发表了以四价碳原子的空间排列为基础的一致的分子结构理论。这种理论认为，迄至当时为止采用的图式不是分子构型的适宜图式。要解释这些光活性问题只有假设碳原子位于四面体的中心，四个化合价指向四角。这样就可以预言一种有机化合物是否包含一个对称的碳原子，并可预告光活性同分异构体的数目。与光活性无密切联系的其它分子对称形式以后相继被发现，并用此理论得到解释，例如某些不饱和化合物，象缩苹果酸和留马利酸（冯·拜耳，1890）及丙二烯（梅特兰，1936）。

## 分析和合成

一旦确立了有机化学原理，进展就十分迅速。人们对许多天然化合物进行了分析，并随后加以合成。马赛赫·贝尔特罗在电弧温度下用碳和氢制成乙炔。1870年他宣布，在暗红色温度下，乙炔可聚合而形成苯；而在较高温度下，可形成已知的萘和蒽等已从煤焦油中提取的化合物。从一氧化碳里，他已经制取了甲酸。

弗兰克兰（1849）、柯尔贝（1849）、弗里德尔和克拉夫特（1877）及其他一些人设计了一些能取代某些原子团或把它们纳入有机化合物的方法，从而为大规模的合成铺平了道路。这样可以对环状有机化合物内每一碳原子的特殊性能加以研究，并运用这些性能制备新的化合物。

这类研究的第一项成果是新的合成染料，新染料的基础是把有机化学运用于容易从煤焦油中提取的化合物。煤焦油原先是廉价的副产品，这时，它的价值高于由煤所产生的煤气或焦炭。人们对许多天然染料进行了分析与合成，如菘蓝、靛蓝等，并进行大量生产，质量较前稳定。由于合成了具有特殊性能，例如不褪色的新染料，因而还可能研究并改进天然染料的这类性能。

1881年开创了药物合成的时代。早期的化学家们曾试图由煤焦油衍生物氮萘制备退热药。早期的一些药如安替比林（1883），未取得很大成功，但两项偶而获得的合成产物——氨基比林和乙酰苯胺(1886)却很成功。一年后制成止痛药非阿西汀，1899年引入称为“阿斯匹林”的乙酰水杨酸作为解热止痛剂。我们只需指出象肾上腺素（1901）和六〇六（1912）这类药物就足以说明有机合成药品给人类带来何等巨大的利益。对其他天然化合物，如树脂、生物碱、萜烯（香料油）和氨基酸等都作了分析，并根据这些分析结果进行了新的合成。

## 化学和生命

上述许多分析对于生命体内化学反应的理解至关重要。在有机化学家们设想合成食品之前，人们认为主要类型的食物是由脂肪、碳水化合物和蛋白质组成的。1823年米切尔·欧金尼·切弗雷尔发表了述及动物脂肪构成的著名论文，他证实动物脂肪是甘油和脂肪族有机酸的化合物。许多人企图合成这类脂肪，例如采用把石蜡氧化成酸的方法，但都没有成功。工业部门为克服脂肪短缺而运用对脂肪油加氢的方法，是一项重大的贡献，这种脂肪油从前不宜供人类食用，现在变成人造黄油。我们转回到本题，下面应讨论化合物，包括糖、淀粉及纤维素。

对碳水化合物的分析成为一个棘手的问题。几种同分异构的乙类糖，如葡萄糖、果糖、半乳糖和山梨糖已经提取出来，爱密尔·费歇尔在1887年还发现了第五种糖，称为甘露糖。藉助于新的立体化学，费歇尔阐明了它们的构型，而到1900年已完成上述诸类及自然界中未知的其他一些糖的合成；虽然其中没有一项具有十分经济的工业应用价值，但这时至少可以知道人体是如何形成这些糖类的。从简单的“单糖类”知识出发，科学进一步阐明了双糖例如蔗糖的结构。

费歇尔还继续探索更复杂的碳-氢-氧-氮化合物——蛋白质

和嘌呤的本质。已经发现，存在于人们饮用的茶、咖啡和可可中的各种嘌呤是嘌呤的衍生物，一些这样的化合物，如咖啡因、可可碱等，在1897—1899年间已经合成。构成大多数生命组织的蛋白质已证实是非常复杂的分子。大约在1926年，测出它们的分子量约为68,000左右。

1820年亨利·勃莱孔诺从胶中获得一种物质，他称之为甘氨酸，它是由许多种蛋白质分解而成的。李比希和他的学生们又发现很多这类产物，并确定它们是氨基酸或其衍生物。费歇尔从1899年起从事此项领域的研究，并建立了由单氨基酸组成的称为多肽的复杂结构图。即使是最复杂的合成蛋白质，其分子量也不过是1,325，人们离蛋白质的完全合成相差甚远，虽然对它们的结构一般说来是了解的。

对于存在于生命体内的其他物质也作了分析。理查德·维尔斯塔特揭示了称为叶绿素的植物中绿色物质的成分（1906—1913）。他发现叶绿素与正铁血红素有密切关系；正铁血红素与珠蛋白相结合生成血液中的红色物质——血红蛋白。他还确定了植物色素或花色甙的结构，它们经常与活的植物体内的葡萄糖或其他糖分子相结合。

人体吸收食物的过程及细胞和腺体形成各种化合物的过程，开始成为化学家们的研究课题。他们逐渐发现许多前辈们不曾知道的新化学物品和化学反应。冯克（1912）对各种维生素作了命名，以后它们被陆续分离出来，其中少量维生素是保持人体健康所需的。1931年卡勒分离出幼小动物成长所必需的甲种维生素，1937年库恩和莫利斯实现其合成。其他各种维生素，如维生素$B_1$、$B_2$、C等都被提取，并在大多数场合确立了工业规模的生产。本世纪前几十年，对于无管腺或内分泌腺的内分泌物即“荷尔蒙”也做了类似的研究。虽然其中大多数的化学成分都已知道，但只是合成了少数几项，如肾上腺素。现已查明，荷尔蒙对过程的控制起传令者作用；维生素直接参与细胞的正常活动过程。强有机

催化剂“酶”的作用由巴斯德在1878年做了研究。

## 新发现并列入周期表的元素

十八世纪，化学实验室的装备有了相当程度的发展，这不仅表现在采用了新型的收集和分析气体用的装置，还引入了较为完善的蒸馏和分馏装置。运用支架和橡皮管（1840）使化学家能制造较为复杂的仪器，并使他们不依赖于古代的“粘土”，也不再与玻璃容器、陶器和金属发生不安全的接触。化学实验家逐步采用物理学的仪器：温度计、比重计、量热计、天平及显微镜，都留放在这里。伏打电池及以后的供电形式导致典型的电解方法的出现。戴维和其他人用电解法分离出许多新的元素。元素可以根据其火焰的典型颜色加以判断，这一事实提供了十分有效的分析方法。由基尔霍夫和本生（1860）研制的分光镜立即导致特殊分光技术（光谱分析）的出现，并发现了许多新的元素，如铯、铷、铊和铟。当杰利特在1886年为测量光活性而研制了一种实用的仪器后，光活性就被用作分析技术的基础。阿贝在1874年制成实用的折射仪，以后折射率就成为控制化合物和产品的十分有用的工具。

十九世纪初，一些杰出的人物如盖-吕萨克、杜马、伯齐利乌斯、格梅林、李比希、维勒和本生等人已发展了分析化学的经典重量分析和体积分析技术，伏累森纽斯等人的一些手册保存了几个世纪。本生、勃特和亨培尔发现了先进的气体分析方法；电化学技术主要是由吉布斯（1864）和克拉逊（1882）建立的。微量材料的显微分析是由普列格尔于1910至1916年期间拟定的；利用吸收材料通过分离柱的速度不同而建立起来的色层分离法和化合物的离析是1906年发明的，但在1930年前未曾广泛应用。比色法始于十九世纪下半叶。

这些新的工具和方法扩展了人们的无机化合物知识，其程度远远超出拉瓦锡的期望。事实上，伯齐利乌斯在1814年已经用34

种符号来代表他所知道的元素。在格梅林的化学手册中(1852)，此数已增至52。化学家们试图在不断增多的元素数量中发现某种规律，这是不足为奇的。已经看得出来一些元素形成某些“家族”，如齿素（氯、溴和碘），它们具有共同的性质。1864年由于伯齐利乌斯、杜马、曼利格那斯和斯塔斯的精细分析，使原子量确定可靠，这时约翰·亚历山大·纽兰兹和欧德林试图把各种元素列成一表，并指出表内每七个元素性质呈现出周期性的变化，他们称此表为“八音律”。此“规律”遭到人们的嘲笑；但1869年洛特尔·迈耶尔根据原子量绘制原子体积图表时再次指出：“元素的性质是原子量的周期性函数。”这种周期性规律由俄国化学家德米特里·门捷列夫于同年制订的表清晰地加以说明。在他1872年制定的表中，不仅把六十种已知的元素合乎逻辑地排成八组，还根据周期性规律预言存在二十七种新元素，并认为新元素可被发现以填补他表中从氢（H＝１）至锂（Li＝７）以及可能比氢还轻的元素之间的位置。到1900年已确实知道了二十八种元素，门捷列夫的预言已经被证明是寻找新元素的极好线索。他不知道的一组元素是“惰性气体”(氦、氪、氩、氖等)，它们与其他化学元素结合的趋势很弱，雷利和拉姆赛(1894—1902)发现空气中有少量这类元素。本世纪柏克勒尔和居里（1895—1902）发现并研究了放射性和放射性元素，对于它们的研究不仅证实了许多新的元素，而且使人们能研究原子的产生和分裂，并实现古代许多炼金术士们的理想：使元素嬗变，甚至合成自然界中根本不存在的元素。

在新发现的元素中，有一组不易分离且长期无法作适当分类的金属。1794年加德林提取了钇，1803年克拉普罗特和伯齐利乌斯发现另一种与其密切相联的新金属铈。两者是最早的“稀土元素”，其中不少于十五种是1830至1907年间发现的。这些元素具有紧密相关的性质，但很难把它们置于周期表内，克鲁克斯把它们称作“间位元素”（1887）。化学家们能把它们列入周期表

序列是以后的事。随着对原子结构更深入的了解，引入了“原子序数”这一概念，原子序数而不是原子量成为周期表排列的基础。

## 化学家采纳物理学方法

十九世纪，物理学家们对于气体的性质作了更为深入的研究，普通气体动力学的建立使化学家们开始采用许多物理学的方法以提取新元素和化合物。这样，用液化和蒸馏方法分离了氯和惰性气体。物理学家们还发展了有益于化学家使用的其他一些方法。

杜隆和裴替特运用比热的概念帮助解决原子量问题及原子分子学说。诺曼（1831）和柯普（1864）发现，分子量和比热的乘积近似地等于组成元素原子热的总和。这促使柯普对其他物理性能是否也是加成的进行了研究。这似乎是一个分子体积问题，但以后发现，它不仅是一种加成的而且也是一种基本的性质。

由洛仑茨和洛仑士（1880）拟成公式的分子折射力，是化学家研究有机化合物结构十分实用的工具。一般地说，化学反应时光的产生和吸收已引起早期化学家如冯·格罗撒斯（1818）和德雷珀等（1841）的注意。他们认为，某些反应被光线所促进，而光线的一部分能量被吸收。本生和罗斯科（1857—1863）作了定量测定，并设计了测量光强度的仪器——曝光计。这种光化学对照相术的发展至关重要。现代光化学系基于阿尔伯特·爱因斯坦1912年推演的光化学等价理论。

化学史上早已讨论过电化学定律及电能和化学能之间的关系。法拉第曾提出电解的定量规律。阿累尼乌斯（1887）对电离作用作了进一步的研究，他认为电解质溶液内分子的分解是一种持久现象，并指出它与冰点电荷的测量一致。此项电解学说可以解释许多实验。在同一时期，热力学和热学理论已被化学家们用于研究反应速度及平衡问题。

## 化合和分解

自温策尔时代（1777）起，化学反应过程已引起化学家们的兴趣。1850年，威尔海姆发表了第一个数学式（用于蔗糖加酸的转化），贝尔特罗及他的学生们开始对此课题加以研究。1867年古德贝格和瓦格提出化学动力学的基本规律——“质量活动规律”。范特·霍夫在1877年开始测定“反应系数”，他相信它是给定条件下每一反应的特征，并于1884年公布了他对化学动力学的研究成果。以上两项成果的发表开创了对说明温度对反应活性影响的单相和多相反应物系统的一系列研究。

这些研究工作很快扩展到催化现象，即某些反应由于看上去并不参与反应的物质的存在而加速这样一个事实。催化一词是伯齐利乌斯提出来的（1836），他发现，很细的铂丝能使酒精加速氧化成醋酸。这个问题由奥斯特瓦尔德作了深入研究。1894年发现，还存在着反向催化作用，即某些物质使反应延缓，而在其他一些情况下，反应本身所形成的物质促进反应的进行（自动催化）。此外也发现了一些物质能“抑制”催化剂，使它变得无活性。有时痕量潮气似乎起到催化剂的作用，虽然后来的一些研究者对此表示怀疑（波顿斯坦，1933）。催化剂作用已证明是近代工业化学发展中的一个重要原理，在工业化学的合成、加氢作用和裂化过程中广泛运用催化作用。

古代化学家们曾创造“亲和力”一词说明为什么物质之间会发生化学反应。亲和力在伯格曼、李希特和温策尔等人的表中起很大的作用，但当对化学反应的研究导致产生一个较为合理的概念——“平衡常数”时，“亲和力”这一概念就不再使用了。当两个反向的反应速度恒定不变时，就可指示出“平衡常数”。温度、体积或压力对此常数的影响是逐步揭示的，在上世纪末、本世纪初，这些情况已相当清楚。

吉布斯对化学平衡作了令人满意的热力学解释。他的最重要

概括之一“相律”被鲁兹布姆、班克洛夫和芬德莱加以研究，它在工业中有非常重要的应用价值。

## 溶液

对化学溶液的彻底研究不仅揭示了许多未知现象，而且还开辟了一些新的应用领域。液体经薄膜而渗滤的现象（渗透作用）已由阿贝·让、安东尼·诺来特在1748年加以研究。他们发现，溶液能通过薄膜吸引溶剂并产生压力，此压力甚至会使薄膜胀破。1867年特劳伯拟订了生产人造薄膜“半可透膜”（范特·霍夫曾对此作了研究）的方法，指出化学溶液所产生的“渗透压”对于给定的溶液来说是持久的（1885）。对溶液所进行的这些研究工作导致将热力学应用于研究溶液性质及其浓度之间的定量关系。业已证明，稀溶液内的溶质分子遵循与盖-吕萨克的气体定律甚至与阿弗加德罗的气体定律相类似的规律。

这些研究的结果之一是可利用渗透压测定溶液内物质的分子量。因为在溶液的蒸汽压和渗透压之间有一定的相互关系，所以一旦知道溶质的浓度，也可以通过溶剂蒸汽压的相对降低来测定分子量。劳尔特的著作（1886）修正了这一推理。用同样方法还发现，溶剂沸点的上升和冰点的降低都与溶液分子浓度成比例。这些规律是研究高分子化合物的有力武器，同时与上文讨论过的电解理论相联系。以范特·霍夫和阿累尼乌斯的学说为依据，使能斯特有可能发展他对电极电位、液体结合电位及伏打电池电动势的解释。

1861年托马斯·格雷姆已经观察到，溶液内某些物质很容易透过薄膜，而其他一些物质则不然。因为透过的物质如糖和盐是可以结晶的，格雷厄姆就称它们为晶体，而称其他一些物质为液体，包括明胶、硅酸等。以后对这种“渗析”过程作了进一步的研究，并且认为胶体属于另一族。席格蒙迪发明的超显微镜（1903）使化学家得以对它们进行更为深入的研究，并且发现它

们虽然表观上是均质的，但实际上它们是其他液体或气体甚至固体内的微小固体或液体微粒组成的多相悬胶体。牛奶、雾和烟是物质胶体状态的典型例子，对于胶体状态的研究极为重要。已经证明，藉助于电解质，或其他使介质中电荷消失的方法（这些电荷吸引着悬浮液中的粒子）可使胶体絮凝或沉淀。这一原理已在实践中加以利用，例如由乳胶制成的橡胶电极和使考特雷尔仪器内的化学烟气消失，就是利用这一原理。这项研究工作还促成在不同的液体或气体内对物质进行乳化（亦即制造胶体）的良好方法，这类过程（以及反乳化的逆过程）被用于陶器和瓷器制造、制革、染色、农业生产、面包制作以及人造丝的生产中。

## 化学和农民

十九世纪初，德桑苏已发现硝石（硝酸钾）促进许多植物和谷物的生长（1804）。李比希对肥料很感兴趣。他确定，植物从空气中的二氧化碳吸收碳，但它们的正常生长还需要其他元素。劳斯和吉尔伯特在罗塞斯坦特的著名实验（1843）中确定，氮、钾和磷是最为必需的元素。在斯塔斯富特附近的钻井发现了钾碱矿源（1852），物理化学有助于指导该处自1861年起优质钾碱的生产。贝塞麦炼钢法提供了适于肥料生产的含磷炉渣。劳斯首次使用制糖厂的炭作肥料，因为其中兼含磷和碳化合物；以后用硫酸处理骨头以制取磷肥。石灰的过磷酸盐可由炼钢工业的炉渣和天然磷酸盐制得，以后主要制成磷酸铵。氮通常以硝酸盐形式提供使用，它们储藏于秘鲁和智利海岸地区，从1830年起运入欧洲。以后由于发明了大气固氮，秘鲁和智利硝酸盐的垄断地位被逐步打破，所需的硝酸钠很容易由工厂生产的氨或硝酸制得。因而复合肥料，如磷酸钙-铵等，开始投入市场。化学还对虫害进行了研究，并发明了烟熏剂（1920）及杀虫剂（1924）以消灭害虫和植物病害，同时着手研究制服病毒和细菌。

## 化学教育

在十八世纪，化学即使被列入了课程表也仍把它作为医学的一个学科加以讲授，例如波尔哈夫就是这样做的。十九世纪，化学在大学的科学课程中赢得了自己的地位。歌德首先任命药剂师戈特林（1789）为耶拿大学化学教授，以后他委任李比希在吉森（1824）担任相似的职务。在法国，除了沃克林外，甚至没有一个著名的化学家正式设有供实际指导学生用的实验室。

巴黎则是十九世纪初化学教育的中心，从1830年起，美国和其他的外国学生开始向德国聚集。早期最著名的化学学校是设立在吉森的李比希实验室（1825—1851），但维勒在哥廷根，本生和柯尔贝在海德尔堡和马尔堡的实验室以及伦敦皇家化学学院（1845）也开始吸引学生们，到十九世纪末，欧洲和美国一些主要大学的化学教育已经良好地建立起来。

# 第二十六章

# 近代化学工业的兴起

在十九世纪，近代化学工业是与近代化学平行发展的，但它的若干分支，例如煤气和煤焦油化工，可追溯到更为遥远的年代。

## 街道和家庭用的煤气

煤气是冶金工业者在进行煤焦化时所得到的副产品之一。伯奇和西赛尔或达敦诺尔的伊尔也曾制得这种气体，他们试图制成在船上用的焦油或沥青。十八世纪有几位科学家查明煤气可用于照明。菲利浦·莱蓬在1797年试验由木材、油和沥青制取煤气，最后取得他的“热灯”专利（1799），但此灯并不成功。与此同时，爱米·阿格德设计了一种环形灯头，其中被火焰消耗掉的部分空气是从中心流入，而其余的空气则随着灯罩所产生的气流沿火焰表面流过。他把专利权许可证卖给博尔顿，但他的灯头为许多人所仿造。阿格德创造了近代油灯和煤气灯的基本型式，然而自己却破产身亡。

默多克在康渥尔为博尔顿和瓦特工作，他被莱蓬和闵哥勒斯等人的工作所鼓舞，先在自己家里安设煤气照明，最后在阿敏和平时期(1802)，因在鱼尾状灯头内燃烧煤气为伯明翰附近的苏霍铸工厂照明而一举成名。曼彻斯特第一家安设煤气灯的工厂节省了大量原来消耗于蜡烛的费用，默多克于1808

年获伦敦福德勋章。

惠泽尔于1801至1810年间在德国发展煤气照明的努力落空，但在几次失败后，终于使英国国会对此发生兴趣，于1812年成功地建立了特许煤气照明和焦炭公司。他藉助于塞缪尔·克赖格的工作获得成功，后者是一些重要项目的主要发明者，如水密煤气嘴、煤气净化器、煤气阀、煤气表和其他煤气生产方面的基础性零件。1813年在惠斯特明斯特桥上，几年后又在圣·马格兰特教堂内安设了煤气灯。大陆照明公司在弗赖堡（1811—1816）用煤气照明取得许多成功的经验，而英国专家威廉和德劳利于1825年在汉诺威建立了第一家德国煤气工厂。一年后柏林安设了煤气。1816年美国费城的皮尔博物馆首先出现实验性煤气照明，六年后波士顿采用煤气为街道照明。次年成立了纽约煤气照明公司。伦敦煤气工厂在头二十年中出现了一个新兴工业不可能避免的缺陷——密封不严、漏气和火灾。但当莱明用可以再生的氧化铁提纯煤气（1847）后，且由于比尔斯排风扇的发明（1855）和制成专用气密管道及接头，上述情况立即改观。1886年，由于冯·威尔士巴赫发明了煤气灯白炽罩，煤气照明引起了人们更大的兴趣，此后鱼尾式灯头被逐步取代，1900年前后被弃置。此外，蓬特(1879—1899)发明了煤气产品的专用分析方法，并确立了作为商用质量指标的热值。由于发明了适宜的灯头和煤气计量装置，蓬特为煤气工业提供了有力的武器，足以与开始渗透到家庭的新兴石油和电力工业的竞争相抗衡。

## 煤焦油化学制品

焦化窑的另一项副产品注定要成为有机工业化学的基本原料。最初，由浓缩法制成的焦油或沥青用于捻船缝。达敦诺尔的伊尔曾企图探索煤焦油和天然沥青的一些新用途，但在1782年他几乎破产。当煤焦油的几项成分被提取并加以研究后，它的价值逐渐被人们所认识。阿库证实，煤焦油的低馏分是优质油漆稀料

（1815），赖兴巴赫从煤和木焦油中分离出石蜡油（1830），伯赛尔指出了木馏油的性质。

蒸馏成为离析天然焦油成分的方法。1813年布鲁曼塔尔制成从酒中提取酒精的第一台近代精馏塔。酒精是当时法国制糖业所必需的。德拉斯尼和塞弗尔改进了此塔，它被广泛地用于从酒或马铃薯泥中生产酒精，同时还发展了此塔的几种变型。它们大大有助于煤焦油和石油工业的兴起。

法拉第在1825年曾描述过苯，弗里奇（1841）和霍夫曼制成了苯胺（1843）。当孟斯菲尔德在1849年开始研究煤焦油并指出如何由此种廉价原料大规模制取苯时，煤焦油的许多其他成分已为有机化学家们所知晓。在以后的二十年里，苯、甲苯、二甲苯、萘、蒽醌及其他重要的成分都从煤焦油中被分离出来，其中每一项都成为合成染料、药物和化学制品的基本材料。霍夫曼的学生珀金爵士本打算从苯胺中制成奎宁，却首次获得了从煤焦油提取的染料——苯胺紫（1856）。一年后开始苯胺紫的工业规模生产。1859年，弗库从商业用苯胺剂制得品红，随后许多其他苯胺染料也被制得，如尼科尔松的里昂兰，霍夫曼的甲基紫罗兰等。

在英国一家酿酒厂工作的德国人格里斯（1858—1864）发现了有重要意义的重氮化合物，它们可与其他有机物如酸和胺相结合而产生多种染料。重要的肽类染料是阿道夫·冯·拜耳（1871—1887）在德国发现的。德国的煤焦油工业迅速崛起，并在全世界有机染料生产中居首位。

优质快速染料，所谓“硫醚”型染料，是在1893至1902年间研制的；一些新型染料，如阴丹士林染料、离胺染料（1922）、散胶染料（1924）、酞花青染料（1934）等都已可供使用；当时从煤焦油中制取合成染料已取得相当丰富的经验。同时，有机化学家们还相继合成了许多天然染料。珀金于1868年制成香豆素，格拉伯和李伯曼制成茜素染料（1869）——茜草的主要成分，拜

耳制成靛蓝（1880）。

## 基本无机化学制品

在十八世纪，还可以看到生产肥皂、玻璃和纺织工业所需基本化工产品的新化学工业的兴起，这些生产部门当时已经使用很纯的天然产品。到1750年，主要用烧矾方法制成的硫酸已在漂白、镀锡、镀金和制毡中占重要地位。一些早期的硫酸制取者们如华特曾试图在玻璃罐内燃烧硫及少量硝石，使所形成并吸收于水中的弱酸浓缩。罗伯克想到可在大型铅容器内实现上述全过程，1749年他在普雷斯顿盆地（爱丁堡）建立了第一家“铅室法”工厂。以后他还在该厂制造苏打、白铅、铅黄、钾碱和明矾。这样的制酸厂以后发展至伦敦（1772）和鲁昂（1766），酸价降至每磅6便士。德·拉弗利和盖-吕萨克改进了“铅室法”，希尔成功地使用了焙烧黄铁矿时所产生的硫黄气，从而把铜或铁的加工和生产与硫酸的加工和生产连结在一起。新的铅焊技术（1850）使之得以建成较大的车间。

1831年菲利浦发明用催化剂使二氧化硫（硫燃烧时所产生的）加空气和水直接转变为硫酸的方法，取得了专利。催化剂这种物质只促进反应而不参与反应。但直到1900年，才由惠克勒和克尼奇阐明杂质对催化剂的抑制作用，并且这种“接触法”取代了原先的“铅室法”。

许多世纪以来，碱的唯一来源是木灰或海藻灰。法国科学院为由食盐制取苏打的过程提供了大量资金。此法是由尼古拉斯·勒布兰（1789）发现的，他把硫酸钠（在盐酸厂内由盐和硫酸制得）和木炭及白垩在返焰炉内转变为一种物质，从这种物质中可萃取纯碱和水。这种既价廉又很纯的合成碱对于玻璃制造大有裨益，从而可能生产纯净的玻璃和洁白的肥皂。第一座制碱厂在1790年开工于圣但尼，碱价立即降到原来的十分之一。此法由坦内特引入英国，到十九世纪上半叶，终于取消了重盐税，并把货物

税减低到相当水平，制碱工业开始繁荣起来。1863年恩斯特·索尔维发现了使氨、二氧化碳和盐转变为碱的方法，此法完全取代了勒布兰的“黑碱制造法”。

由于缺乏化学知识，使制造者们不得不用经滤取的粪便与石灰的混合液或从土墙中收集“硝石花”的方法制取硝石(硝酸钾)，它是火药的重要原料，也是一种肥料。直至发现智利的天然沉积物并从而使欧洲使用大量硝酸盐以后，上述情况才得以改观。而到了二十世纪，已能把空气中的氮直接转变为硝酸钾，这种方法是南美天然硝酸盐的剧烈竞争者。

## 天然物质的转化

某些天然物质开始成为化学制品的重要来源，尤其是空气。一旦认识到氮是空气的重要成分，人们就试图把它固定成有价值的化学制品。尼亚加拉瀑布大气产品公司（1902）和伯克兰及爱德（1903）把氮化合成亚硝酸盐和硝酸盐或硝酸。借助于电力可把生石灰和碳制成碳化钙，然后通过在氮气中加热能把碳化钙转变成氨腈钙，再把它转变为氨和氢氧化钠溶液。如有必要，可将此氨气氧化成硝酸，从1914年起，它成为大规模应用的制硝酸方法。能斯特、哈伯和波胥根据对这些过程的物理化学研究，由高压的氮和氢合成了氨，第一家合成氨工厂开设于1917年。从此，就可以运用这种方法生产肥料所需的各种硝酸盐。

哥伦布登上新大陆时，曾看到当地居民用植物液汁制成的球玩耍。十八世纪，德·福赖斯纽对这种“橡胶”抱很大兴趣，并且由于他的宣传，使橡胶获得许多用途。普利斯特列发现这是擦掉铅笔字迹的良好工具，因而后人称为“橡皮”。对于工业上的用途来说，必须把这种带有粘性的柔软易腐的天然产品转变为较硬的、塑性较低但较为耐用的固体。这种硫化方法是C·古特也尔发明的（1839）。以后发现，用胺等催化剂可加速此过程（奥斯拉格，1906）。后来还发明了使橡胶与矿物粉末、油、蜡、焦

油和纤维合成的方法；在压力下定型和加热成所需物品，例如汽车轮胎的方法。还发现废橡胶在稀释的氢氧化钠溶液内加热可以再次使用（1889）。橡胶与诸如纺织纤维、金属、木材及石棉等建筑材料的组合技术使橡胶在化学工业、公路建设和其他工程领域内均得到了应用。

石油从渗出地面到用作照明或润滑油，经历了几个世纪。自从德拉克的油井（1859）开采这种地下贮存的矿物燃料后，石油就开始被大量采用。1900年前石油主要用来提取煤油，它完全取代了鲸油和其他动物油或植物油、碳油及酒精。从石油或页岩油馏分中提取的一定量的石蜡也是一种有价值的代用品，它代替了制造硬脂蜡烛用的猪油和动物脂肪，因而使食用脂肪仍用于人类消费。除煤油、润滑油、沥青和液体燃料外，还有汽油，它是早期工业中的一种质轻易燃的废弃品，但是随着汽车的出现，汽油开始变得异常重要。

所有上述产品都是经酸碱洗涤通过蒸馏及化学精炼而制得的。1912年特路柏尔为原油在管式蒸馏器内加热后蒸发的总蒸馏馏分发明一种分馏浓缩系统，以后此系统就取代了旧式的蒸馏器。到二十年代，化学精炼法被萃取法所取代，先用液态二氧化硫，后用苯及丙酮或其他溶剂萃取，这种方法使精炼者可将任何原油转变为顾客所需要的产品。

随着汽油需求量的增加，原油中的天然汽油含量已不敷使用，原先用于生产较多煤油的裂化方法这时被用于增加汽油的产量。休姆弗赖斯和鲍顿(1913)首次成功地实现了裂化过程，以后杜勃斯、克劳斯和其他许多人又相继对此作了研究。大约在1936年，这些使石油承受高温高压的液相裂化方法被汽相裂化法所替代；被汽化的油借助催化剂的作用，在高温高压下进行裂化。这类方法对生产汽车和飞机中现代内燃机所用的高辛烷汽油和其他经济燃料具有十分重要的意义。

某些原油中的天然丙烷和丁烷，以及在裂化装置内所产生的

煤气，是有机化工产品十分优异的原料。第二次世界大战后，石油化工崛起；这时，石油化工开始从煤气制取市场所需的大量乙醇、甘油、洗涤剂、杀虫剂、合成纤维和其他化工产品，而过去煤气除作燃料外，很少还有其他用途。

## 合成原料

如上所述，石油已成为许多合成化工产品的原料。这些产品过去是由油、脂肪、马铃薯等天然物质制成的，现在这些物质可供人类消费。煤炭工业部门试图寻找贫油国家燃料和润滑剂供应的解决方法。1913年柏吉乌斯（1884—1949）拟订了借助泥煤、褐煤或煤把石油和煤焦油的重残渣转变为轻发动机燃料的方法；把这些煤先变成糊状，然后再在200个大气压和400℃左右温度下用氢加以处理。在适用的高压设备研制成功前，这种方法运用多年，曼塞堡首先在洛伊那工厂开始生产这种燃料（1927）。费歇尔·特洛伯奇（1925）研究的完全合成方法由鲁尔化学股份公司在1934年首先付诸实现。这种哥格森方法取材于焦煤、空气和水，先由空气和焦煤生成水煤气，用由此形成的一部分氢气使剩余的水煤气转化为合成原油，然后就可以象石油那样加以处理。

与此同时，还生产了合成橡胶和合成纤维，这些新的材料补救了天然原料有限的供应。首批此类材料之一是合成橡胶。1860年威廉斯已经发现，橡胶分解时产生一种称为异戊二烯的有机物品，它在空气和光的作用下可重新转变为类似橡胶的物质。于是很快就确定，天然橡胶是异戊二烯的聚合物，它是由许多异戊二烯分子组成的。

拜耳公司的一位化学家霍夫曼在1906年由乙炔制成与此密切相关的碳氢化合物——丁二烯，它很容易被合成。由于对丁二烯的聚合作用进行了研究，霍夫曼和考特尔在1909年由丁二烯制成合成橡胶；在第一次世界大战期间，德国将它们作为丁钠橡胶进行生产。经哈里斯研究后（1902），开始生产各种类型的丁钠橡

胶，其中每种橡胶在某一方面可远优于天然橡胶，但没有一种象天然橡胶那样用途广泛。这种缺陷促使美国化学家们对这一问题加紧研究，纽兰特首先由乙炔制成单乙烯基乙炔，他又用盐酸把单乙烯基乙炔转变为氯丁二烯，然后再聚合成优质产品“氯丁乙烯橡胶”（1931）。“氯丁乙烯橡胶”、“聚硫橡胶”、“氯丁橡胶”和其他类似人工橡胶品种的商业化生产大大有助于克服第二次世界大战时天然橡胶的短缺，又因为可由石油中大量且廉价地制取原料，所以这些合成橡胶的生产方法被保存下来。

在此期间，“塑料”一词包括一系列全新的合成材料，其中有许多是专门想摹仿天然产品的发明家们发现的。霍特兄弟寻求到一种适合于制造台球的“人造”物质。他们把樟脑和硝酸纤维混合在一起，得到一种透明的材料，称为“赛璐璐”（1869），它立即被用于各种目的。以后又发现可把酪蛋白和甲醛“缩合”（聚合）成人造牛角。其中有些塑料受热时“固定”或“硬化”（热固性），另外一些在高温下塑性加大，但在冷却时变硬（热塑性）。

1905至1907年间，贝克兰德成功地把酚（由煤焦油中制取）和甲醛与色素填充剂一起缩合成酚醛塑料。其粉末状基料可在热压机内予以固定，其余一些热塑料可通过加热及凝缩后加压而使之成形。酚醛塑料完全是一种合成材料，因为两种原料都可从煤、石灰、水和空气中制取。与其类似的其他塑料或“树脂”是甲丙烯酸脂、乙烯基树脂和聚苯乙烯树脂，且每隔十年就发现许多新型塑料，它们可取自煤或石油产品、空气、水及廉价的化工产品。

一些塑料还促进了新纤维的生产。第一项合成纤维是由肖贝促成的，他用纤维素和硝酸制成硝化纤维素，并对其溶液的性质进行了研究。巴斯德的学生德·查道纳特·希拉尔于1884年取得一项专利，他把硝化纤维素的酒精和乙醚溶液通过“喷丝头”的细孔压入槽内，该槽吸收溶液而留下“人造丝”。第一件这类

"人造丝"服装在1887年的巴黎展览会展出。克劳斯和贝凡(1882)研制了足以与人造丝匹敌的由黄原酸脂纤维素(由纤维素、碱液及焦硫酸碳等形成) 制成的再生纤维丝，将其纺成粘胶人造纤维，是一种良好的棉花代用品。1865年肖采卜格发明了称为"赛勒尼兹"的醋酸人造丝，1904年首批投入商业性生产。

以后又发现许多合成纤维，如制酪蛋白的酪素纤维，或仅由煤、石油、水和空气制成的完全合成纤维，如杜邦的"尼龙"(1939)。在尼龙以前所生产的一切纤维其分子结构仍取决于它们的天然特性，而尼龙及以后完全合成的纤维则可以在某种程度上通过"设计"而产生某些所要求的性能。这类纤维通常先制成丝状，然后切成较短的长度，再象羊毛那样进行纺织，在某些情况下，纺纱前还掺入羊毛或棉花。某些这样的纤维已具有天然纤维所没有的特定性能。此外，在塑料兴起的这段时间内还研制了许多合成药物、香料、清漆和硝基漆。

## 新的优质食品

在上两个世纪期间发现了两种重要的新食品——甜菜糖和人造黄油。1747年玛格拉夫(1709—1782)已使柏林科学院注意到这样一个事实，某些植物例如甜菜中含有糖分。他的学生阿恰特在1786至1798年间持续试验后，终于在库纳（西里西亚）建立了一座制糖厂。制糖方法是把甜菜切碎，用水萃取，再把萃取物煮沸，用石灰精制，然后加以浓缩。但当时从甜菜中只提取百分之三的糖，而现在通过适当的选择和良好的精制，可以提取百分之十六的糖。甜菜糖的生产得益于大陆封锁时期的食糖匮乏，当时拿破仑促进了许多新制糖厂的建立，拿破仑失败后，此项生产幸免于衰落而且被保存下来。

十八世纪六十年代末，在法国海军部队服役的曼格-莫利斯发现一种从板油中分离较软脂肪的方法。这种方法以后大为简化，只需对这些动物脂肪稍微加热和加压即可。分离出来的油

称为油精，固体部分称为“硬脂”或“人造黄油”。此法于1869年在英国取得专利，不久就为美国牲畜饲养场所采用。硬脂肪作为“奶油”出售，到1880年，即使在荷兰，也有约五十家生产这类“穷人白脱”的工厂。到1890年发现，把它和例如花生油和棕榈油等植物油相混合，可生产熔点接近普通白脱的一种物质，它的质地和味道以后逐步有所改进。在发现氢化作用能使液态油精硬化（1910）后，上述物质的产量大为增加。

虽然奥立佛·伊凡斯已在1795年设计了第一台用来大量生产面粉的自动磨，但直到现代初期，面包制作在欧洲仍是一项真正原始的技艺。在十九世纪，优质蛋丝已取代原来的棉花或羊毛作为筛粉用的筛子的原料，而老式的石磨也换成铁制或瓷器辊子。用明矾或其他物质脱色的危害性已为人们所认识，为了迎合制成白面包的风气，引入了较为适用的化学制品。面包商所用的酵母（它是现代面包房酵母的先驱）被制成压缩形式，它取代了发酵用的麸。但从十九世纪下半叶起，其他一些食品开始减价并且全年均可供食用，从而使面包消费量急剧下降。

食品掺假在过去是很普遍的，这种情况已引起阿古姆的注意（1820）。十九世纪大多数欧洲国家都开始发觉这一问题，并制定了食品及药物生产条例（如英国在1860年制订并于1872年进行了修改）。但食物的重大改进起源于食品的新贮存方法，它使来自世界各地的货物均可供利用并向世界居民提供廉价且稳定的食物供应。这些发现也许较历史学家们普遍公认的任何其他革命更有助于促进世界人口的增长，并创造更为良好的社会条件。

## 世界性食物贮存及船运

由于引入脱水、罐头制作及冷藏三项新技术，使世界范围内运送的食物贮存成为可能，这几项技术取代了古代的腌制、干制和熏制方法。脱水方法首次由李比希（1810）成功地运用于肉汁。经脱水的液体或固体可随意地加以保存及运输。1865年格里

贝特用英国资本建立弗莱·本托斯（乌拉圭）的李比希公司。有些人曾企图用明火蒸发的方法保存精制的牛奶，但未获成功。格里姆惠特采用蒸汽护封的盘子和局部真空获得脱水牛奶（1847）和奶粉（1855）专利。但商业规模的成功始自鲍顿（1853），他的专利于1856年获准，于是立即在美国以及奈斯脱尔在瑞士楚格湖附近的昌姆厂加以运用。这种“脱水”的浓缩牛奶里加有糖（它抑制细菌的生长）并装于锡罐内。优质奶粉只是在宙斯特和赫特梅格于1902年取得专利以后才制成的。巴斯德的研究促成1890年前后建立了一般消费用牛奶的巴氏灭菌法。

罐头工业的兴起系由于阿帕特的努力结果，他受到盖-吕萨克和压力锅发明者巴宾工作的启发。1810年他成功地把食物贮存在玻璃容器内，此容器用软木塞或马口铁盖盖紧以防空气进入，因为正是空气使食物变坏。他于1804年开设的工厂在1814年的战争中被毁，1815年重新开工，从此使用锡罐头。德赫恩和杜兰取得制造优质马口铁容器的专利，从此，用罐头贮存食物的方法便开始流行。

1830年起，罐头肉、鱼及蔬菜已可供居民食用，但市民对此不甚感兴趣，最主要的消费者是陆军和海军。缺点在于罐头容积太大。1852年海军当局的调查表明，较大容器内的罐装食物质量不好，以后把最大容量减至6磅，但直至十九世纪末，罐头食品才开始大众化。两个在英国的美国人厄顿华特和凯撒特在1819年把这些技术引入英国。1825年凯撒特取得了“马口铁罐”——简称“罐头”的专利。1868年麦克纳尔和利伯公司创建于芝加哥。到1880年，罐头龙虾、鲑鱼、蕃茄、牛奶、果酱、水果和肉类都已出现。

罐头制造业得益于良好的贮存和制罐头方法的出现。阿帕特方法过程缓慢，高尔达纳对此作了改进，他把要罐装的食物浸渍在130℃的煮沸盐溶液内。以后巴尔的摩的Ⅰ.梭罗门采取加压煮烧方法（1874）。罐头密封因艾伦·泰罗发明的落锤压机(1874)

以及“模压制机”（1876）的出现而得以改进，因此到1880年，一台机器每天可制作约1,500个罐头。罐头的顶孔及（锡焊的）锡盖一直保持到1900年，以后可用卷曲方法加以密封，这样就消除了罐头制作和污染方面的缺陷。当本世纪初生产标准规格的马口铁后，自动制罐头机也就成为可能。

这时质量较高的罐头食品开始拥入世界市场。蔬菜罐头由1870年的4,000,000盒增至1914年的5,000,000盒，该年共销售12,000,000盒水果罐头，其中包括菠萝罐头，1892年首次在夏威夷制成此罐头。应该了解，汽车工业和石油工业成了马口铁容器和模压机械的最好买主，它们也导致糖果、烟草制品及巧克力罐头的出现。

## 冰及冷冻食品

几个世纪以来，在局部地区一直用天然冰使食品保持新鲜，但1805年弗里德里克·杜道尔开始把新英格兰各州的冰块用船运至南部各州和加勒比海地区。1820年他在新奥尔良建立巨大冰库，甚至用船把冰运到加尔各答。在欧洲，主要的天然冰贸易设于挪威。美国1872年船运的冰量多达225,000吨，但在开始生产并销售人造冰后，上述数字迅速下降。1894年生产了1,500,000吨机制冰，1926年增至56,000,000吨。这种冰很早就用于巴黎的饭馆，因为爱德蒙·卡兰在1850年左右设计了小型真空冷冻机。食物不仅用冰包装进行船运，而且还建成了具有装冰室和通风机的冷藏车以冷却堆放食品的主要空间。

伦福德、戴维、开尔文、焦耳、皮克特和冯·林德等人的理论研究导致了完善的冷冻机的设计，因而使机制冰的生产成为可能。用冰块不可能使空间冷却至2—3℃以下。只有完善的致冷机才有这种可能。这类机器是由柯克为他在勃斯盖特的石蜡油工厂设计的（1862）。卡兰制作了第一台吸收机，坦利尔首先制成压缩致冷机。法国人德·考帕特已使用卡兰机生产纯净的冰，而

早期具有小槽盒的致冷机只能生产有孔且不透明的冰。近代冯·林德机出现于1881年，皮克特机出现于1875年。底罗里尔甚至在他的实验室里制成了“干冰”（冷冻的二氧化碳），但只是在1925年纽约干冰公司投产后，才开始大量制造干冰。

一些先驱者首先注意的是肉类的冷冻和装运问题。莫特在悉尼建立第一座机冻冷库（1861）。1873年哈里森在墨尔本建立了另一座冷库，并在帆船“诺弗尔克”号上安装致冷机准备运送二十吨冻肉，但因机器损坏，肉未运成。坦利尔和卡兰在1868至1874年间设计了新式致冷机。他们的工作继续获得更大成功。卡兰甚至取得了可冷冻到—25至—35℃的机器专利（1876）。同年坦利尔用他在英国建造的拉·弗里高利菲克号船从南美运回肉类，但从布宜诺斯艾利斯至南特需行驶三个月，肉的成本太高。1877年“巴拉圭”号以大为缩短的时间运回第一批优质阿根廷冻肉，此项成就确立了冻肉贸易。1879年斯特拉斯列文号从澳大利亚运往伦敦四十四吨冻肉。

致冷机这时也用于冷却大容量的冷库，西方冷藏公司于1878年建立芝加哥冷库，先用冰块冷却，但自1886年起采用机器致冷。伦敦的第一座冷库建于1881年，次年在阿根廷和德国建立相似的建筑。1927年大约有200座冷库，总容积超过40,000万立方英尺。帕尔莫在1888年设计了第一辆新式车后，冷藏车也开始采用致冷机，从此用打捞冰块冷却的旧式车辆迅速消失。尽管普遍的偏见把这类产品视作二等货，但在1890至1917年间，冷冻食物的致冷和运输仍在快速发展。在第一次世界大战后，居民们才开始普遍乐于食用。

值得注意的技术进步是在冷冻工厂内引入多级压缩机、弗利昂致冷剂（它广泛代替致冷机中的氨）和蒸汽喷射致冷（1945）。家庭中也开始使用小型冰箱。这类“电冰箱”的生产是考帕兰德和戈斯努力的结果。二十世纪二十年代，凯尔文特公司和电冰箱公司开始投产。1937年美国有2,000,000多台电冰箱投入使用，

而欧洲在二十年代前尚未开始使用。

低温速冻始自古代冰盐混合物的运用。派帕尔（1861）和哈里森（1855）的先驱性研究由奥泰赛（1911）予以完成。以后采用间接低温冰冻法，此法导致德韦和A·波士顿（1938）的克雷瓦斯（Cryovac)方法。1925年美国在这方面的先驱人物伯德赛和赫尔将低温冰冻扩展到预先煮过的食物，到三十年代，冰冻食品公司开始商业化生产。

## 机械化农场

在此期间，先进的食物贮存方法与快速的交通工具如蒸汽船相结合，使澳大利亚和南北美洲的农作物及食品均可供欧洲人食用，它增进了欧洲工业生产的商品制造以及把商品换成海外食物。但家用食品生产在一定程度上被忽视了。例如，海外上等鱼的稳定供应导致鲱鱼消费量的下降，这是欧洲古代主要的食品，1850年后，虽然采用快速“深海”拖网渔船并对拖网的设计和操作进行了改进，这种现象仍未能制止。在大多数国家，因为工业兴起，农业有些被忽视。

在现代科学和技术的影响下，食品生产本身也开始现代化。此处不拟介绍从十八世纪末开始出现的新食物、新轮种周期以及新肥料等。仅需强调指出的是，随着交通运输的发展，农场的生产不再是为农业居民提供当地市场的剩余农产品，它们开始为地区和国际市场进行生产。由于采用科学的方法并加以科学管理，在十九世纪，每英亩产量有相当程度的增长。

从我们的观点来看，农场的机械化更为重要。在努力对农业作总体改革的同时，十八世纪的农艺学家们还采用机器进行播种和收割。米克尔制成第一台实用脱粒机（1788），它不仅可打下谷粒，而且还能筛去谷皮并把谷物和杂草分开。1794年考克发明了生产牲畜饲料用的切草机。但这类机械尚未普遍采用。

机械化的第二个回合始于美国拓荒者向西部挺进和在中西部

起伏平原上的定居。钢制零件开始用于农业机械，这些机械的发明取代了许多仍由手工操作的割、捆、脱粒等工作（曼宁、休赛、考密克）。到1850年，一些工厂开始制造这类机械。玛许受机械作坊皮带系统的启发，把耙地与收割操作结合于一个机器内（1834）。1875年开始使用联合收割机和脱粒机，大约在1878年，在新式打捆机中仍运用打结机构，但几年后就出现用康拜因对谷物进行收割、脱粒、净化和装袋。

这些现代农业机械的原型完全是由马匹牵引的。只有在本世纪初出现了拖拉机，尤其是出现可在泥泞土地和粘土上行进的充气轮胎式拖拉机（1932）后，才可能达到完全的机械化。第一台不仅能收割和脱粒，而且还能捆扎麦秸并把麦粒装入袋内的“康拜因”于1936年投入使用，这是向农业全盘机械化迈出的第一步，从而使移民的农田变成了“麦子工厂”。

## 技术进入家庭

我们曾有机会指出由于煤气、电、煤油和冰箱的应用，使家庭所发生的变化。但我们不应忘记在最后一百五十年间，其他一些技术成就使我们家庭革命化的程度甚至超过过去帝王能力之所及。化学及细菌学的兴起促进了优质饮水的供应。十九世纪在许多欧洲城镇仍然采用公共污水池和“马桶”系统，但在查明这种原始系统对公用水源的潜在危害后，就把其废除了。封闭的排水系统、水的净化及中心供水系统取代了十九世纪初尚普遍使用的私人水井和公用泉水。本世纪初，大多数欧洲城镇都有可靠的供水系统，每一居民的耗水量又上升至罗马帝国时代所记录的数字。到1870年，在私人家庭内，浴缸已较为普遍，十年后家庭淋浴室开始普及。煤气和电力的应用又促进家庭水暖系统的安设。

通风问题已在十八世纪主要由S·霍莱斯和雷恩进行了研究。但甚至在议会大厦这样的公共建筑内，通风条件仍很恶劣。戴维已提议要改变这种不可容忍的状况，但直到1846年雷特才得

以实施这些计划。在家庭取暖方面，仍大量使用敞式炉火甚至火盆，虽然在十八世纪下半叶有许多科学家，例如富兰克林，曾试图废除这种不经济的火焰辐射取暖法，而把燃烧着的燃料封闭于火炉内，用这种方法加热室内空气，并通过适当的空气循环使热量扩散。这一意图最后导致人们所熟知的火炉的出现，但其他一些发明家则尝试利用水、空气和蒸汽进行直接或间接取暖的系统。伦福德对于弥勒教授（1821）在柏林和慕尼黑研制的热空气取暖系统颇感兴趣，英国人通过他才知晓此系统。这就是雷特在议会大厦中所采用的系统。第一家专门从事热空气系统研究的公司是由奥格斯堡的哈格开设的（1841）。

蒸汽在蛇形管内循环使屋内暖和的方法是由考克研究的。1800年左右，几个纺织厂如托特和史蒂文逊工厂采用的间接蒸汽取暖大约在1815年由伦福德引入德国。低压蒸汽由阿尔贝在1830年前后用于他在帕劳（曼克林堡）开设的工厂进行加热。到1870年，蒸汽取暖在私人住宅中更加普及。热水采暖系统是由鲍纳玛尼在1777年向法国科学院提出的。这种系统在1819年左右首先用于英国柏林顿有拱廊的街道上的两所房子内，并由德国铜匠帕尔佐于1844年在柏林工业展览会上展出。1860年后，阿·尼克曼在德国的一些学校和公共建筑内建立了几套热水取暖系统。中心采暖系统被保存下来。本世纪二十年代美国开始出现空气调节以及在居住空间采用冷却设备。至此，普通人们可以享用适当的烹饪、取暖、照明、洗涤和饮用设施，而在1800年左右，人们还生活在苛刻的条件之下。

# 原 书 跋

历史的叙述就要结束了。我们痛感研究数学和物理科学的历史有一种不能避免的缺点：历史是永远不会完结的；即使有人把它延长到今天，同样也不会完结。实际上，科学是活生生的、持续发展的，它的过去、现在和将来没有绝对分明的界限；不管选择什么时间结束历史，写作时就已经失掉了意义。

我们选定的最后日期是现代科学（我们相信对于现代一词大致会有共同的理解）形成以前的年代。我们认为这是合适的。但是也常常感到，这样做确实不能满足真正想要研究和了解以后年份的读者完全正当的愿望。

技术的情况也是这样。工业革命在十九世纪中叶开始发展，但是一直到二十世纪以前，普通人们并没有真正明显感到工业化急速前进的步伐。二十世纪以来，人们普遍感到取暖、照明、通讯工具、电话、电报、收音机和电视机，海、陆、空运输，食物贮存等方面都发生了巨大的变化。自从那时起，工业化开始对西方广大群众的生活条件发生巨大影响，以至于现在不可能具体描述二十世纪初的小康水平怎样会造成这样许多急剧的变化。工业化的反响以及和它有关的无数发现与发明，如果不是浅尝辄止的话，是值得分别论述的。

我们已经为本书论述范围的局限作了辩解，还有必要为论述本身再作辩解吗？还有必要为科学史的存在理由或必要性再作争辩吗？如果那样，这部科学史就完全失去了目标。但是，我们希望，那些对于现代科学和与现代科学紧密相关的现代技术感兴趣

的人，同样关心科学技术是怎样结合起来形成伟大的精神力量的，这样我们就可以得到安慰了。

历史上有过这样的时代，在那时，科学是极少数人从事的与实际生活无关的研究，技术是实践者的事情，科学与技术的精神价值被认为是微不足道的。在那时，人们可以任意轻视科学技术的发展。但是，这种时代一去不复返了。科学技术已经联合起来，它们二者已经从这种联合中得到巨大的利益，可以期望将会继续得到更多的好处，科学技术已经成为文化的重要而强有力的因素。愿意自觉感受我们所处时代脉搏的人，不能把科学技术发展的历史排除在他的兴趣范围之外。

# 人名索引


Abbe,Ernst (1840—1905) 阿贝

Abū al-Wafā (940—约997) 阿布·阿尔·瓦法

Abū Ma'schar (Albumasar) (777—886) 阿布·马萨

Accum,Friedrich (1769—1838) 阿古姆

Achard,Franz C. (1753—1821) 阿恰特

Adams,John Couch (1819—1892) 亚当斯

Adelard of Bath (约1100年) 贝斯的阿德拉德

Aeneas Baraeus 埃尼斯·鲍洛斯

Aeneas Tacticos (约公元前300年) 埃尼斯·泰克底索斯

Aepinus,Franz,Ulrich Theodor (1724—1802) 埃皮努斯

Agricola,Georgius (1494—1555) 阿格里高拉

al-Battānī (约858—929) 阿尔·巴塔尼

al-Bitrûǧî (约1175年) 阿尔·贝特鲁奇

al-Ma'mūm (786—839) 阿尔·玛姆

al-Mansūr (约712—775) 阿尔·曼苏尔

al-Zargâlî (1029—1087) 阿尔·查格利

Alanus de Insulis (约1128—1202) 阿尔努斯·德·英苏利

Alban,Ernst (1791—1856) 阿尔贝

Albategnius, 见al-Battānī 阿尔·巴塔尼

Albert of Saxony (约1325—1390) 萨克森的阿尔伯特

Alberti, Leon Battista (1404—1472) 阿尔伯提

Albertus Magnus(Albert of Bollstädt) (1193—1280) 阿尔柏特斯·麦格努斯(波尔斯泰特的阿尔柏特)

Albumasar (卒于886年) 阿尔布玛扎尔

Alcuin (735—804) 阿尔昆

Alembert, Jean le Rond d' (1717—1783) 达兰贝尔

Alexander of Hales (1170/80—1246) 海勒斯的亚历山大

Alexander the Great (公元前356—323) 亚历山大大帝

Alfraganius (九世纪) 阿尔法拉加尼斯

Alhazen, 见Ibn-al-Haitham 伊本·阿尔·黑森

Allamand, Jean-Nicholas-Sébastien
(1713—1787) 阿拉曼特

Alpetragius (约1175年) 阿尔帕特拉宙斯

Amici, Giovanni Battista (1786—1863) 亚米齐

Amontons Guillaume (1663—1705) 阿蒙顿

Ampère, André Marie (1775—1836) 安培

Anaxilaos of Larissa (约公元前50年)
拉里萨的阿那克西罗斯

Anaximander (公元前610/9—546/5) 阿那克西曼德

Anaximenes (公元前585—528) 阿那克西米尼

Andrews, Thomas (1813—1885) 安德雷斯

Ångström, Anders Jonas (1814—1874) 埃斯特朗

Anthemios of Tralles (卒于约534年)
特雷利斯的安特米奥斯

Apollonius of perga (约公元前262—170)
帕尔格的阿波罗尼乌斯

Appert, Francois (1750—1841) 阿帕特

Appolt, John George (1800—1854) 阿波特

Aquinas, Thomas (1224/5—1274) 托马斯·阿奎那

Arago, Dominique-Francois 阿拉贡
(1786—1853)

Aratus of Soli (约公元前275年) 梭里的阿拉吐斯

Archimedes of Syracuse (约公元前287—212)

叙拉古的阿基米德

Arcy, Patrick, Count d' (1725—1779) 达赛

Argand, Aimé (1755—1803) 阿格德

Argelander, Friedrich Wilhelm August 阿格朗德

Aristarchus of Samos (约公元前320—250)
萨摩斯的阿利斯塔克

Aristotle (公元前384—322) 和Aristotelianism
亚里士多德和亚里士多德主义

Aristyllus (公元前三世纪) 阿里斯泰路斯

Arkwright, Sir Richard (1732—1792) 阿克莱

Arnald of Villanova (1240—1311) 维拉诺瓦的阿那尔得

Arrhenius, Svante August (1859—1927) 阿累尼乌斯

Arsonval, Jacques Arsène d' 达尔生伏尔
(1857—1940)

Arzachel (1029—1087) 阿扎切尔

Ashmole, Elias (1617—1692) 阿许莫尔

Assurbanipal 阿苏贝尼帕尔 (亚述国王)

Astbury, John (1688—1743) 阿斯特堡

Augustine, st (354—430) 圣·奥古斯丁

Augustus, emperor of Rome 罗马皇帝奥古斯都
(公元前63年—公元14年)

Auzout, Adrien (1622—1691) 奥佐特

Averroës, 见Ibn Rushd 阿威罗伊

Avogadro, Amadeo (1776—1856) 阿弗加德罗

Bacon Francis (1561—1626) 弗兰西斯·培根

Bacon, Roger (约1210—约1293) 罗吉尔·培根

Baekeland, Leo Hendrik (1863—1944) 贝克兰德

Balard, Antoine Jérôme (1802—1876) 巴拉德

Baliani, Giovanni Battista (1582—1666) 巴利阿内

Ballot, Christopher Henryk Buys (1817—1890) 巴罗特

Balmer, Johann Jacob (1825—1898) 巴尔默

Bancroft, Edward (1744—1821) 班克洛夫

Banks, Sir Joseph (1743—1820) 班克斯

Baraeus, Aeneas 巴拉欧斯

Barba, Alvarez Alonzo (约1620年) 巴伯

Bartholinus, Erasmus (1625—1698) 伊拉斯谟斯·巴塞林

Bartholinus, Thomas (1616—1680) 托马斯·巴塞林

Bartholomeus Anglicus 安格里克斯

Bauer, Georg, 见Agricola 鲍尔

Bayen, Pierre (1725—1798) 巴扬

Bayer, Adolf von 阿道夫·冯·拜耳

Bayer, Johann (1572—1625) 约翰·拜尔

Beccaria, Giovanni Battista (1716—1781) 贝卡利亚

Becher, Johann Joachim 贝歇尔

(1635—1682)

Becquerel, Antoine-César (1788—1878) 安东尼·贝克勒尔

Becquerel, Alexandre Edmond (1820—1891)

爱德蒙·贝克勒尔

Bede (Baeda Venerabllis) (674—735) 比德 (可敬的比德)

Beeckman, Isaac (1588—1637) 比克曼

Beer, Wilhelm (1797—1850) 比尔

Behrens, Georg Bernhard (1775—1813) 贝伦斯

Bel, Joseph Achille le (1847—1930) 勒贝尔

Belisarius General (约505—565) 伯利塞鲁斯

Bell, Alexander Graham (1847—1922)

亚历山大·格拉姆·贝尔

Bell, Henry (1767—1830) 亨利·贝尔

| | |
|---|---|
| Benedetti, Giovanni Battista (1530—1590) | 班纳带蒂 |
| Bennet, Abraham (1750—1799) | 贝内特 |
| Benz, karl (1844—1929) | 本茨 |
| Benzenberg, Johann Friedrich (1777—1846) | 本岑贝格 |
| Bérard, Joseph Frédéric (1789—1828) | 贝拉尔 |
| Bergier, Nicolas (1567—1623) | 伯奇 |
| Bergius, Friedrich (1884—1949) | 柏吉斯 |
| Bergmann, Torbern (1735—1784) | 伯格曼 |
| Berliner, Emil (1851—1929) | 柏林纳 |
| Bernard of Chartres (卒于约1130年) | 夏尔特尔的伯纳德 |
| Bernoulli, Daniel (1700—1782) | 丹尼尔·伯努利 |
| Bernoulli, Jacques (1654—1705) | 雅克·伯努利 |
| Bernoulli, Jean (1667—1748) | 让·伯努利 |
| Berosus | 柏罗苏斯 |
| Berthelot, Pierre Eugène Marcelin (1827—1907) | 贝尔特罗 |
| Berthollet, Claude-Louis (1748—1822) | 贝尔托莱 |
| Berzelius, Jöns Jacob (1779—1848) | 柏齐利乌斯 |
| Bessarion, Cardinal Johannes (1395—1472) | 贝塞利翁 |
| Bessel, Friedrich Wilhelm (1784—1846) | 贝塞尔 |
| Bessemer, Sir Henry (1813—1898) | 贝塞麦 |
| Besson, Jacques (约1550年) | 柏森 |
| Beukelszoon, Willem (约1330年) | 包克尔松 |
| Bevis, John (1693—1771) | 贝维斯 |
| Biela, Wilhelm, Baron von (1782—1856) | 比拉 |
| Biot, Jean-Baptiste (1774—1862) | 毕奥 |
| Biringuccio, Vannoccio (1480—1539) | 毕林古邱 |

Birkeland, Kristian (1867—1917) 伯克兰

Black, Joseph (1728—1799) 布拉克

Bliss, Nathaniel (1700—1764) 布利斯

Blumenthal, Cellier 布鲁曼塔尔

Bode, Johann Elert (1747—1826) 波德

Bodenstein, Ernst August Max (1871—1940) 波顿斯坦

Boerhaave, Hermann (1668—1738) 波尔哈夫

Boethius, Anicius Manlius Severinus (约480—524) 波埃修斯

Bolos Democritos of Mendes (约公元前200年) 曼德斯的鲍洛斯·德谟克利吐斯

Boltzmann, Ludwig (1844—1906) 玻尔兹曼

Bond, William Crouch (1789—1859) 邦德

Borden, Gail (1801—1874) 鲍顿

Borelli, Giovanni Alfonso (1608—1679) 博雷利

Borghesano of Bologna 波伦亚的波海沙诺

Borough, William (1536—1599) 波罗

Bosch, Karl (1874—1940) 波胥

Bose, Georg Matthias (1710—1761) 博塞

Böttger, Johann Friedrich (1685—1719) 包特格

Bouguer, Pierre (1698—1758) 博格

Boulton, Matthew (1728—1809) 博尔顿

Boyle Robert (1627—1691) 波义耳

Braconnot, Henri (1781—1855) 勃莱孔诺

Bradley, James (1693—1762) 布拉德莱

Bradwardine, Thomas (约1290—1349) 布莱德瓦尔丁

Brahe, Tycho (1546—1601) 布拉赫

Bramah, Joseph (1748—1814) 勃拉姆

Branca (约1629) 勃兰加

| | |
|---|---|
| Brandes,Heinrich Wilhelm (1777—1834) | 布兰德斯 |
| Brandt,Kennig (1694—1768) | 勃兰特 |
| Brashear,John Alfred (1840—1920) | 布拉希尔 |
| Brewster,Sir David (1781—1868) | 布儒斯特 |
| Bridgewater,3rd Duke (1736—1803) | 布里奇沃特公爵三世 |
| Brotherhood,Peter (1838—1902) | 布拉德霍德 |
| Brougham,Henry Peter,Baron (1778—1868) | 布鲁厄姆 |
| Brunel,Isambard Kingdom (1806—1859) | 布鲁内尔 |
| Bruno,Giordano (1548—1600) | 布鲁诺 |
| Brush,Charles Francis (1849—1929) | 伯路希 |
| Buffon,Georges Louis,Lcelerc Comte de (1707—1788) | 布丰 |
| Bunsen,Robert Wilhelm (1811—1899) | 本生 |
| Buridan,Jean (约1300—1385) | 布里丹 |
| Cagniard-de-la-Tour Charles (1777—1859) | 德·拉·图尔 |
| Cailletet,Louis Paul (1832—1913) | 凯莱特 |
| Cajori,Florian (1859—1930) | 卡约里 |
| Caldani,Leopoldo Marc-Antonio | 卡尔达尼 |
| Callippus (生于公元前370年) | 卡立普斯 |
| Cannizzaro,Stanislao (1826—1910) | 康尼查罗 |
| Canton,John (1718—1772) | 坎顿 |
| Capella,Martianus Minnaeus Felix | 坎培拉 |
| Carlisle,Sir Anthony (1768—1840) | 卡莱色尔 |
| Carneades (公元前214—129) | 卡尔尼德斯 |
| Carnot,Lazare-Nicolas-Marguerite (1753—1823) | 尼古拉·卡诺 |

Carnot, Nicolas-Léonard-Sadi 萨迪·卡诺
(1796—1832)
Cartwright, Edmund (1743—1823) 卡特拉特
Cascariolo, Vincenzo 卡斯卡里奥罗
Cassini Giovanni Domenico (1625—1712) 卡西尼
Cassiodorus, Flavius Magnus Aurelius 卡西奥多拉斯
(约490—580)
Castelli, Benedetto (1577—1644) 卡斯特里
Cauchy, Augustin-Louis (1789—1857) 柯西
Cavalieri, Bonaventura (1598—1647) 卡伐略利
Cavendish, Henry (1731—1810) 卡文迪许
Celsius, Anders (1701—1744) 塞尔苏斯
Cessart, Louis Alexander de (1719—1806) 德赛沙特
Chalcidius 恰尔基狄
Charas, Moise (1618—1698) 查拉斯
Chardonett, Hilaire Comte de (1839—1924) 德·查道纳特
Charlemagne (约742—814) 查理曼
Charles Ⅱ (1630—1685) 查理二世(英国国王)
Chevreul, Michel Eugène (1786—1889) 切弗雷尔
Childe, Gordon (1892—1951) 查尔德
Chladni, Ernst Florens Friedrich (1756—1827) 克拉尼
Cicero 西塞罗
Clairaut, Alexis-Claude (1713—1765) 克莱尔特
Clapeyron, Emile (1799—1864) 克拉珀龙
Clausius, Rudolf (1822—1888) 克劳修斯
Clavius, Christopher (1537—1612) 克拉维乌斯
Clegg, Samuel (1814—1856) 克赖格
Cleopatra 克来奥派脱拉
Colbert, Jean Baptiste (1619—1683) 柯尔伯特

| | |
|---|---|
| Colladon, Jean-Daniel (1802—1892) | 柯莱顿 |
| Columbus, Christopher (1451—1506) | 哥伦布 |
| Comarius | 康玛瑞乌斯 |
| Comte, Auguste (1798—1857) | 孔德 |
| Conant, James Bryant (生于1893年) | 康南特 |
| Condamine, Charles-Marie de la(1701—1774) | 德拉·孔达米纳 |
| Constantine (约288—337) | 康士坦丁(罗马皇帝) |
| Copernicus, Nicolaus (1473—1543) | 哥白尼 |
| Coriolis, Gustave-Gaspard de (1792—1843) | 柯利奥利斯 |
| Corliss, George Henry (1817—1888) | 考利斯 |
| Cornelisz, Cornelis (of Uitgeest) | 考内利茨 |
| Correns, Karl Erich (1864—1933) | 考仑斯 |
| Cort, Henry (1740—1800) | 考特 |
| Coster, Laurens Jansz | 考斯特 |
| Cottrell, Frederick Gardner (生于1877年) | 考特雷尔 |
| Coulomb, Charles Augustin de (1736—1806) | 库伦 |
| Couper, Archibald Scott (1831—1892) | 库珀 |
| Courtois, Bernard (1777—1838) | 库图瓦 |
| Cowper, Edward (约1857年) | 考潘 |
| Crafts, James Mason (1839—1917) | 克拉夫特 |
| Crawford, Adair (1748—1795) | 克劳福德 |
| Crompton, Samuel (1753—1827) | 克伦普敦 |
| Crookes, Sir William (1832—1919) | 克鲁克斯 |
| Cross, Charles Frederick (1855—1935) | 克劳斯 |
| Cruickshank, William (1745—1800) | 克鲁克香克 |
| Cugnot, Nicholas Joseph von (1725—1804) | 库纳 |
| Curie, Pierre (1859—1906) 和Marie | |

皮埃尔·居里和玛丽·居里

(1867—1934)

Cusanus, Nicholaus (1401—1464) 库萨奴斯

Cuthbertson, John (十八世纪) 卡斯伯特森

Daguerre, Louis Jacques Mandé 达格尔

(1789—1851)

Daimler, Gottlieb (1834—1890) 达姆勒

Dalton, John (1766—1844) 道尔顿

Damascius (约458—533) 达马斯丘

Daniell, John Frederic (1790—1845) 丹尼尔

Darby, Abraham (1677—1717) 达比

Darius Ⅱ 大流士二世(波斯国王)

Davenport, Thomas (1802—1851) 但维朴特

Davy, Sir Humphry (1778—1829) 戴维

Dawes, William Rutter (1799—1868) 道斯

De la Caille, Nicolas-Louis (1713—1762) 德·拉卡伊

De la Condamine, Charles-Marie (1701—1774)

德拉孔达米纳

De la Rive, Auguste-Arthur (1801—1873) 德拉里夫

De la Rue, Warren (1815—1889) 德拉鲁

Dee, John (1527—1608) 约翰·狄埃

Deiman, Joan Rudolf (1743—1808) 戴曼

Deluc, Jean-André (1727—1817) 德吕克

Democritus (约公元前460—公元前370) 德谟克利特

Derosne, Charles (1780—1846) 德拉斯尼

Desaguliers, Théophile (1683—1744) 德扎格利埃

Descartes, René (1596—1650), 和Cartesianism

笛卡儿和笛卡儿主义

| | |
|---|---|
| Deslandres,Henri Alexandre (1853—1948) | 德朗德尔 |
| Desormes (1777—1842) | 德索梅斯 |
| Dewar,Sir James (1842—1923) | 杜瓦 |
| Diades | 第阿德斯 |
| Dietrich,Johann | 迪特里希 |
| Dietrich of Freiberg (约1250—1310) | 弗莱伯格的第里希 |
| Digby, Sir Kenelm (1603—1665) | 狄格白爵士 |
| Diodor | 狄奥多 |
| Dionysios of Alexandria (约公元前400年) | 第奥努西奥斯 |
| Diophantus (约公元250年) | 第欧放达斯 |
| Dollond,John (170′ -1761) | 道朗 |
| Doppler,Christian Johann (1803—1853) | 多普勒 |
| Draper,John William (1811—1882) | 德雷珀 |
| Drebbel,Cornelius (1572—1634) | 德兰贝尔 |
| Dudley,Dud (1599—1684) | 多特莱 |
| Dufay, Charles-Francois de Cisfernay (1698—1739) | 迪费 |
| Duhem,Pierre (1861—1917) | 杜恒 |
| Dulong, Pierre Louis (1785—1838) | 杜隆 |
| Dumas,Jean Baptiste André (1800—1884) | 杜马 |
| Dunlop, John Boyd (1840—1921) | 达姆劳普 |
| Dürer, Albrecht (1471—1523) | 丢勒 |
| Dureya,Charles E. | 杜瑞阿 |
| Eastman, George (1854—1932) | 伊斯特曼 |
| Edgeworth,Richard Lovell (1744—1817) | 埃治华斯 |
| Edison,Thomas Alva (1847—1931) | 爱迪生 |
| Einstein Albert (1879—1955) | 爱因斯坦 |
| Ellis Alexander John (1814—1890) | 埃利斯 |

Elsholtz, Johann Sigismund (1623—1688) 埃尔斯霍尔茨

Encke, Johann Franz (1791—1865) 恩克

Epicurus (公元前341—270) 和Epicureanism
伊壁鸠鲁和伊壁鸠鲁主义

Erasmus 伊拉斯谟斯

Ercker, Lazarus (卒于1593年) 欧克

Erman, Paul (1764—1851) 埃曼

Euclid of Alexandria (约公元前300年)
亚历山大里亚的欧几里德

Eudoxus of Cnidus (约公元前408—355)
克尼多斯的欧多克斯

Euler, Leonhard (1707—1783) 欧拉

Eupalinos of Megara (约公元前350年)
曼伽拉的欧帕里诺斯

Euripides (约公元前484—407) 欧里庇得斯

Evans, Oliver (1755—1819) 伊凡斯

Evelyn, John (1620—1706) 伊凡郎

Eyde, Samuel (1866—1940) 爱德

Fabricius, Johannes Albertus (1688—1736) 法布里齐乌斯

Fahrenheit, Daniel Gabriel (1686—1736) 华伦海特

Fairbairn, Sir William (1798—1874) 费阿柏恩

Faraday, Michael (1791—1867) 法拉第

Ferdinand Ⅱ, Grand Duke 斐迪南大公二世

Fermat, Pierre de (1601—1665) 费尔玛

Findlay, Alexander (生于1874年) 芬德来

Firmicus Maternus, Julius (约公元335年) 玛特努斯

Fischer, Emil (1852—1919) 费歇尔

Fizeau, Hippolyte (1819—1896) 斐索

| | |
|---|---|
| Flamsteed, John (1646—1719) | 弗拉姆斯蒂德 |
| Fleming, Sir Alexander (1881—1955) | 弗莱明 |
| Fond, Jean-René Sigaud de la | 芳登 |
| Ford, Henry (1863—1947) | 福特 |
| Foucault, Jean-Baptisfe-Léon (1819—1868) | 傅科 |
| Fourier, Jean-Baptiste-Joseph, Baron (1768—1830) | 傅立叶 |
| Frankland, Sir Edward (1825—1899) | 弗兰克兰 |
| Franklin, Benjamin (1706—1790) | 富兰克林 |
| Fraunhofer, Joseph von (1787—1826) | 夫琅和费 |
| Fresenius, Karl Remigius (1818—1897) | 伏累森纽斯 |
| Fresnel, Augustin (1788—1827) | 菲涅耳 |
| Friedel, Charles (1832—1899) | 弗里德尔 |
| Froben, Johannes (约1460—1527) | 弗罗本 |
| Fuchs, Leonides (1501—1566) | 弗胥斯 |
| Fulbert (约960—1028) | 富尔贝特 |
| Fulton, Robert (1765—1815) | 富尔顿 |
| Funk, Casimir (生于1884年) | 冯克 |
| Gadolin, Johann (1760—1852) | 加多林 |
| Galen (约130—201) | 盖仑 |
| Galilei, Galileo (1564—1642) | 伽利略 |
| Galle, Johann Gottfried (1812—1910) | 加勒 |
| Galloway, Thomas (1796—1851) | 盖洛韦 |
| Galvani, Luigi Aloisio (1737—1798) | 伽伐尼 |
| Gascoigne, William (1612—1644) | 盖斯科因 |
| Gassendi, Pierre (1592—1655) | 伽桑狄 |
| Gauss, Carl Friedrich (1777—1855) | 高斯 |
| Gauthey, Emiland (1732—1806) | 高塞 |

Gautier, Henri (1660—1737) 考梯

Gay-Lussac, Joseph-Louis (1778—1850) 盖-吕萨克

Geber 吉伯尔

Gerard of Brussels (十三世纪) 布鲁塞尔的盖拉尔特

Gerard of Cremona (1114—1187) 克雷莫纳的盖拉尔特

Gerbert of Aurillac (Pope Sylvester Ⅱ)
(930—1003) 奥里亚克的盖尔贝特 (教皇西尔维斯特二世)

Gerhardt, Charles Frédéric (1816—1856) 热拉尔

Gericke, 见Guericke 格里凯

Gesner, Konrad von (1516—1565) 格斯纳

Gibbs, Josiah Willard (1839—1903) 约瑟·吉普斯

Gibbs, Oliver Wolcott (1822—1908) 奥列伏·吉普斯

Gilbert, William (1544—1603) 吉尔伯特

Gill, Sir David (1843—1914) 吉尔

Girard, Albert (1595—1632) 盖莱特

Glauber, Johann Rudolf (1604—1670) 格劳柏

Gmelin, Leopold (1788—1853) 格梅林

Goodyear, Charles (1800—1860) 古特也尔

Graebe, Karl (1841—1927) 格拉伯

Graham, George (1673—1751) 乔治·格雷姆

Graham, Thomas (1805—1869) 托马斯·格雷姆

Gramme, Zénobe-Théophile Z-T·格拉姆

Grassmann, Hermann Günther (1809—1877) 格罗斯曼

Gray, Elisha (1835—1901) 伊莱沙·格雷

Gray, Stephen (1670—1736) S·格雷

Gregory, James (1638—1675) 詹姆士·格雷戈里

Gregory XIII, Pope (1502—1585) 教皇格雷戈里十三世

Gresham, Sir Thomas (约1519—1579) 格雷山姆

| | |
|---|---|
| Griess,Johann Petrus (1829—1888) | 格里斯 |
| Grimaldi,Francesco Maria (1619—1663) | 格里马第 |
| Groot,Jan Cornets de | 格鲁特 |
| Grosseteste,Robert (约1175—1253) | 格罗塞特斯特 |
| Grotthus,von | 格罗杜斯 |
| Grove,Sir William Robert (1811—1896) | 格罗夫 |
| Guericke,Otto von (1602—1686) | 格里凯 |
| Guinand,Pierre-Louis (1774—1802) | 格内特 |
| Guldberg,Carl Maximilian (1836—1902) | 古德贝格 |
| Gurney,Sir Goldsworthy (1793—1875) | 古尼 |
| Gutenberg,Johann Gensfleisch (约1397—1468) | 古腾堡 |
| | |
| Haber,Fritz (1868—1934) | 哈伯 |
| Hadfield,Sir Robert Abbott (1858—1940) | 哈特菲尔德 |
| Hale,George Ellery (1868—1938) | 赫耳 |
| Hales,Stephen (1677—1761) | 霍莱斯 |
| Hall,Chester Moor (1703—1771) | 摩尔·赫尔 |
| Hall,Charles Martin (1863—1914) | 马丁·赫尔 |
| Halley,Edmund (1656—1742) | 哈雷 |
| Hamilton,Sir William Rowan (1805—1865) | 哈密顿 |
| Hancock, Walter (1799—1852) | 亨考克 |
| Hansen,Peter Andreas (1795—1874) | 汉森 |
| Harding,Karl Ludwig (1765—1834) | 哈丁 |
| Hargreaves,James (卒于1778年) | 哈格里夫斯 |
| Harrison,John (1693—1776) | 哈里森 |
| Hārūn-al-Raschid (约765—809) | 哈鲁·阿尔·雷谢德 |
| Hauksbee,Francis (1687—1763) | 豪克斯比 |
| Heine,Bernard de (1800—1846) | 德赫恩 |
| Helmholtz,Hermann von (1821—1894) | 赫尔姆霍茨 |

Helmont, Johann Baptist van (1577—1644) 海尔蒙特

Henderson, Thomas (1798—1844) 亨德森

Henry, Joseph (1797—1878) 约瑟夫·亨利

Henry Ⅳ (1553—1610) 亨利四世（法国国王）

Heraclitus (公元前540—约公元前475) 赫拉克里特

Heraclius (约575—642) 赫拉克利斯

Hermann, Jacques (1678—1733) 赫尔昔

Hermes Trismegistos 赫麦斯·特瑞斯麦吉斯托斯

Hero of Alexandria (约100年) 亚历山大里亚的希罗

Herschel, Caroline Lucretia (1750—1848) 卡罗林·赫舍尔

Herschel, Sir John Frederick William (1792—1871) 约翰·赫舍尔

Herschel, Sir William (Friedrich Wilhelm) (1738—1822) 威廉·赫舍尔

Hertz, Heinrich Rudolf (1857—1894) 赫兹

Hevelius (Hevel或Hewelke), Johannes (1611—1687) 赫维留（赫维尔或赫维尔克）

Heytesbury, William (约1371年) 海特斯布雷

Hezekiah 罕兹金赫

Hieron 希隆（叙拉古国王）

Higgins, William (1769—1825) 黑金斯

Hipparchus (公元前二世纪) 希帕克

Hire, Philippe de la (1640—1718) 德拉·伊尔

Hisinger, Wilhelm Hising (1766—1852) 希辛格

Hoff, Jacobus Henricus van't (1852—1911) 范特霍夫

Hofmann, August Wilhelm von (1818—1892) 霍夫曼

Hohenheim, P.A.T.B. von, 见Paracelsus 冯·霍亨海姆

Holley, Alexander Lyman (1832—1882) 霍莱

Honnecoust, Villard (Wilars) de　　德·霍纳考特
(约1245年)

Hood, Thomas　　胡德

Hooke, Robert (1635—1703)　　虎克

Hornblower, Jabez Carter (1744—1814)　　霍恩布罗

Horrocks, John (1768—1804)　　赫洛克斯

Howe, Elias (1819—1867)　　赫维

Hrabanus Maurus (约776—856)　　莫鲁斯

Huggins, Sir William (1824—1910)　　哈根斯

Hughes, David Edward (1831—1900)　　休斯

Hūlāgū il Khān (1217—1265)　　叙拉库伊儿可汗

Humboldt, Baron Alexander von
(1769—1859)　　洪堡

Humphreys, Andrew Atkinson (1810—1883)　　休姆弗赖斯

Hunain ibn Ishāq (809—877)　　休纳·伊本·伊夏括

Huntsman, Benjamin (1704—1776)　　休斯曼

Huygens, Christiaan (1629—1695)　　惠更斯

Huygens, Sir Constantijn (1596—1687)　　康·惠更斯

Hyatt, John Wesley (1837—1920)　　霍特

Ibn-al-Haitham (Alhazen) (约965—约1039)
伊本·阿尔·黑森

Ibn Rushd(Averroës)(1126—1198)　　伊本·路希德·阿威罗伊

Imhotep (约公元前2750年)　　伊姆霍特帕

Ingenhousz, Jan (1730—1799)　　英吉豪兹

Inghen, Marsilius van (卒于1396年)　　英恩

Isidore of Seville (约560—636)　　塞维尔的伊西多尔

Isidoros of Miletus (六世纪)　　米利都的伊西多洛斯

Isis　　爱西斯

Jâbir ibn Hayyân (Geber) (九世纪) 亚伯尔·伊本·海扬
Jablochkoff,Paul (1847—1894) 雅伯洛赫考夫
Jacobi,Carl Gustav Jacob (1804—1851) 雅可比
Jamblichos 亚姆布立克斯
James I 詹姆士一世（英国国王）
Janssen,Pierre Jules César (1824—1907) 詹森
Jeans,Sir Jamas Hopwood (1877—1946) 秦斯
Johannes of Tinemue 丁奈姆的约翰内斯
John of Holywood (卒于1256年) 约翰·卡帕特
John the Carpenter 卡帕特
Jordanus Nemorarius (约1220年) 约丹纳
Joule,James Prescott (1818—1889) 焦耳

Kapteyn,Jacobus Cornelius (1851—1922) 卡普坦
Karrer,Paul (生于1889年) 卡勒
Kay,John (1704—1764) 凯伊
Kayser,Heinrich Gustav Johannes (1853—1940) 凯泽尔
Kékulé,Friedrich August (1829—1896) 凯库勒
Kelly,William (1811—1888) 凯莱
Kelvin,Lord,见Thomson,William 凯尔文勋爵
Kepler,Johann (1571—1630) 开普勒
Kerr,John (1824—1907) 克尔
Kienmayer,Franz von (1754—1802) 金迈尔
Kircher,Athanasius (1601—1680) 柯奇
Kirchhoff,Gustav Robert (1824—1887) 基尔霍夫
Klaproth,Martin Heinrich (1743—1817) 克拉普罗特
Kleist,Ewald Georg von (1700—1748) 克莱斯特
Klingenstierna,Samuel (1689—1785) 克林根斯蒂尔纳

| | |
|---|---|
| Kolbe,Hermann (1818—1884) | 柯尔贝 |
| Knig Samuel (1712—1757) | 柯尼希 |
| Kopp,Hermann Franz Moritz (1817—1892) | 柯普 |
| Krafft,Georg Wolfgang (1701—1754) | 克拉夫特 |
| Krönig,August Karl (1822—1879) | 克勒尼希 |
| Krnland,Johannes Ma rcus Marci de (1595—1667) | 柯罗恩兰德 |
| Ktesias | 泰西阿斯 |
| Ktesibios (约公元前250年) | 泰西比奥斯 |
| Kuhn,Richard (生于1900年) | 库恩 |
| Kunckel,Johann (1630—1703) | 肯克尔 |
| Kundt,Adolph August Eduard Eberhard (1839—1894) | 库特 |
| Lacaille,Nicolas-Louis de (1713—1762) | 德拉卡伊 |
| Lagrange, Joseph-Louis,Comte de (1736—1813) | 拉格朗日 |
| Lalande, Joseph-Jérôme de (1732—1807) | 德拉朗德 |
| Lambert,Johann Heinrich (1728—1777) | 兰贝特 |
| Lamont,Johann von (1805—1879) | 拉芒德 |
| Langeren,Michael Florent van (卒于1675年) | 朗热隆 |
| Langley,Samuel Pierpoint (1834—1906) | 兰格莱 |
| Laplace,Pierre Simon,marquis de(1749—1827) | 拉普拉斯 |
| Lassell,William (1799—1880) | 拉塞尔 |
| Laurent,Augustin (1807—1853) | 罗朗 |
| Laval,Carl Gustaf Patrik de (1845—1913) | 德·拉瓦尔 |
| Lavoisier,Antoine-Laurent (1743—1794) | 拉瓦锡 |
| Lawes,Sir John (1814—1900) | 劳斯 |
| Le Bel,Joseph Achille (1847—1930) | 勒贝尔 |
| Le Chatelier,Henry (1850—1936) | 李查特利 |

| | |
|---|---|
| Le Febvre,Nicaise (1620—1674) | 费伯列 |
| Le Monnier,Louis-Guillaume (1717—1799) | 勒莫尼埃 |
| Leblanc,Nicolas (1742—1806) | 勒布兰 |
| Lebon Phillipe (1769—1804) | 莱蓬 |
| Leclanché,Georges (1839—1882) | 勒克朗歇 |
| Leeghwater,Jan Adrianszoon (1575—1650) | 利华特 |
| Leeuwenhoek,Antonie van (1632—1723) | 李文虎克 |
| Leibniz,Gottfried Wilhelm Freiherr (1646—1716) | 莱布尼兹 |
| Leidenfrost,Johann Gottlob (1715—1794) | 莱登弗罗斯特 |
| Lemery,Nicholas (1645—1715) | 列麦里 |
| Lenoir,Étienne (1744—1832) | 雷诺 |
| Leonardo da vinci, 见Vinci | 列奥纳多 |
| Leopold de' Medici,Cardinal | 里奥波尔德 |
| Leslie,Sir John (1766—1832) | 莱斯利 |
| Leucippus (公元前六世纪) | 留基伯 |
| Leverrier,Urbain,Jean Joseph (1811—1877) | 勒维烈 |
| Libavius,Andreas (1540—1616) | 利巴乌斯 |
| Libbey,Edward Drummond (1854—1925) | 利贝 |
| Liebig,Justus Freiherr,Baron von (1803—1873) | 李比希 |
| Linde,Karl Paul Gottfried von (1842—1934) | 冯·林德 |
| Lippershey,Johannes (卒于1619年) | 利帕席 |
| Locke,John (1632—1704) | 洛克 |
| Lockyer,Sir Joseph Norman (1836—1920) | 洛凯尔 |
| Lomonosov,Mikhail Vasilyevich (1711—1765) | 罗蒙诺索夫 |
| Lorentz,Hendrik Antoon (1853—1928) | 洛伦茨 |
| Lorenz,Adolf (1854—1923) | 洛伦士 |
| Louis XIV (1638—1715) | 路易十四（法国国王） |
| Louis XV (1710—1774) | 路易十五（法国国王） |

| | |
|---|---|
| Lucretius（公元前95—55） | 卢克莱修斯 |
| Lull,Raymond（约1232—1316） | 卢尔 |
| Lummer,Otto（1860—1925） | 卢默 |
| Macadam,John Loudon（1756—1836） | 麦卡达 |
| Mach,Ernst（1838—1916） | 马赫 |
| Maclear,Sir Thomas（1794—1879） | 麦克利克 |
| Macquer,Peter Joseph（1718—1784） | 马奎尔 |
| Macrobius,Ambrosius Theodosius（约400年） | 马克洛庇斯 |
| Mädler,Johann Heinrich von（1794—1874） | 梅德勒 |
| Malus,Étienne-Louis（1775—1812） | 马吕斯 |
| Manetho | 玛耐托 |
| Manilius,Marcus（约50年） | 玛尼琉斯 |
| Mansfield,Charles Blackford（1819—1855） | 孟斯菲尔德 |
| Möraldi,Giacomo Filippo（1665—1729） | 马拉尔迪 |
| Maocus Antonius de Dominis（1566—1624） | 多米尼斯 |
| Margraff,Andreas Sigismund（1709—1782） | 玛格拉夫 |
| Maria the Jewess | 犹太人玛丽亚 |
| Mariotte,Edmé（约1620—1684） | 马略特 |
| Marius，见Mayr | 马里乌斯 |
| Martianus Minnaeus Felix Capella（五世纪） | 坎培拉 |
| Martin,Archer John Porter（生于1910年） | 马丁 |
| M rum,Martinus van（1750—1837） | 马尔乌姆 |
| Maskelyne,Nevil（1732—1811） | 马斯基林 |
| Maudsley,Henry（1711—1832） | 莫兹莱 |
| Maupertuis,Pierre-Louis Moreau de | 莫泊丢 |

(1698—1759)

Maurice (1567—1625) 毛莱斯（荷兰亲王）

Maurolyco, Francesco (1494—1575) 莫罗利哥

Maxwell, James Clerk (1831—1879) 麦克斯韦

Maybach, Wilhelm (1846—1929) 梅巴赫

Mayer, Julius Robert von (1814—1878) 罗伯特·冯·迈尔

Mayer, Johann Tobias (1723—1762) 迈尔

Mayr (Marius), Simon (1570—1624) 梅耶（马里乌斯）

McCormick, Robert (1780—1846) 考密克

Medici, Cardinal Leopold de'(卒于1675年) 美第奇

Meikle, Andrew (1719—1811) 米克尔

Melloni, Macedonio (1798—1854) 梅伦尼

Mendeléev, Dimitri Ivanovich (1834—1907) 门捷列夫

Mersenne, Marin (1586—1648) 麦山尼

Metcalf, John (1717—1810) 麦卡耳夫

Meton（公元前五世纪） 麦顿

Meyer, Julius Lothar (1830—1895) 梅尔

Michael Scotus（约公元1235年） 米歇尔·斯科脱斯

Michelson, Albert Abraham (1852—1931) 迈克尔逊

Miller, Dayton Clarence (1866—1941) 米勒

Millikan, Robert Andrews (1868—1953) 密立根

Mitchell, John (1729—1823) 米切尔

Möbius, August Ferdinand (1790—1868) 默比乌斯

Moissan, Henri (1852—1907) 摩森

Morland, Sir Samuel (1625—1695) 莫莱

Morse, Samuel Finley Breese (1791—1872) 莫尔斯

Mort, Thomas Sutcliffe (1816—1878) 莫特

Morveau, Louis-Bernard, Baron Guyton de (1737—1816) 德·莫尔瓦

| | |
|---|---|
| Moses | 莫斯 |
| Motte, Andrew（卒于1730年） | 莫蒂 |
| Murdock, William（1754—1839） | 默多克 |
| Mushet, David（1772—1847） | 莫谢特 |
| Musschenbroek, Petrus van（1692—1761） | 莫西伯拉克 |
| Napoleon I | 拿破仑一世 |
| Nāsir al-din-al-Tūsi（1201—1274） | 纳西尔·阿尔·丁·阿尔·杜西 |
| Nasmyth, James（1808—1890） | 纳斯姆士 |
| Nechepso | 尼克普梭 |
| Neilson, James Beaumont（1792—1865） | 内森 |
| Nemorarius, 见Jordanus | 内莫拉伊乌斯 |
| Nernst, Walther（1864—1941） | 能斯特 |
| Neumann, Franz Ernst（1798—1895） | 诺伊曼 |
| Newcomb, Simon（1835—1909） | 纽康姆布 |
| Newcomen, Thomas（1663—1729） | 纽可门 |
| Newlands, John Alexander（1838—1899） | 纽兰兹 |
| Newton, Sir Isaac（1642—1727） | 牛顿 |
| Nicholson, William（1753—1815） | 尼可尔松 |
| Nicol, William（1768—1851） | 尼科尔 |
| Niépce, Jean（1805—1870） | 让·涅普斯 |
| Niépce, Joseph-Nicéphore（1765—1833） | 约瑟夫·涅普斯 |
| Nieuwland, Julius Arthur（1878—1936） | 纽兰特 |
| Nobili, Leopoldo（1784—1835） | 诺比利 |
| Nollet, Jean-Antoine（1700—1770） | 诺来特 |
| Norman, Robert（约1590年） | 诺曼 |
| Nunes (Nonius), Pedro（1502—1578） | 努尼斯 |

| | |
|---|---|
| Odling, William (1829—1921) | 奥特林 |
| Oersted, Hans Christian (1777—1851) | 奥斯特 |
| Ohm, Georg Simon (1787—1854) | 欧姆 |
| Olbers, Heinrich Wilhelm Matthäus (1758—1840) | 奥尔勃斯 |
| Olszevski, Karl Stanislov (1846—1915) | 奥尔热夫斯基 |
| Onnes, Heike Kamerlingh (1853—1926) | 昂南斯 |
| Orata, Sergius (约公元前95年) | 奥拉塔 |
| Oresme, Nicole (约1310—1382) | 奥里斯姆 |
| Osiander, Andreas (1498—1552) | 奥塞德 |
| Ostanes the Magus | 波斯魔法师奥斯坦尼斯 |
| Ostwald, Wilhelm (1853—1932) | 奥斯特瓦尔德 |
| Otto, Nikolaus (1832—1891) | 奥托 |
| Owens, Michael Joseph (1859—1923) | 奥万斯 |
| Pacinotti, Antonio (1841—1912) | 帕西诺蒂 |
| Page, Charles Grafton (1812—1868) | 佩奇 |
| Palissy, Bernard (约1510—1590) | 帕利赛 |
| Palladio, Andrea (1518—1580) | 帕拉提渥 |
| Papin, Denis (1647—1712) | 巴宾 |
| Pappus (约300年) | 帕波斯 |
| Paracelsus (1493—1541) | 帕拉塞尔苏斯 |
| Parmenides (约公元前500年) | 巴门尼德 |
| Parsons, Sir Charles Algernon (1854—1931) | 帕森斯 |
| Pascal, Blaise (1623—1662) | 巴斯卡 |
| Pasteur, Louis (1822—1895) | 巴斯德 |
| Pecham, John (卒于1291年) | 皮坎姆 |
| Peirce, Benjamin (1809—1880) | 皮尔斯 |

Péligot,Eugène Melchior（卒于1812年） 帕利高特

Peltier, Jean-Charles-Athanase 佩尔蒂埃
(1785—1845)

Perkin,Sir William Henry（1838—1907） 珀金

Perronet, John Rodolph（1708—1794） 帕罗内特

Petit,Alexis-Thérèse（1791—1820） 裴替特

Petosiris 裴托西瑞斯

Petrus Peregrinus（约1250年）
波特洛斯·波列哥雷努斯

Petty, Sir William（1623—1687） 威廉·配第

Peurbach, John（1423—1461） 潘巴赫

Philip of Macedonia 马其顿的菲力浦

Philolaus（公元前五世纪） 费劳拉斯

Philo of Byzantium（约公元前250年） 拜占庭的菲罗

Philoponus, John（六世纪） 菲罗波诺斯

Piazzi,Giuseppe（1746—1826） 皮亚齐

Picard,Jean（1620—1682） 皮卡德

Pictet,Marc-Auguste 皮克特

Pierre de Maricourt（约1250年）
皮埃尔·德·马利考特

Plancius, Petrus（1551—1622） 布兰修斯

Planck, Max Karl Ernst Ludwig（1858—1947） 普朗克

Planta, Martin（1727—1772） 普朗泰

Planté,Raimond-Louis-Gaston（1834—1889）
普朗特

Plato（公元前429—347）和Platonism
柏拉图和柏拉图主义

Pliny the Elder（23—79） 老普林尼

Poincaré, Jules Henri（1854—1912） 彭加勒

Poinsot, Louis (1777—1859) 潘索

Poisson, Siméon-Denis (1781—1840) 泊松

Polhem, Christopher (1661—1751) 波尔姆

Poncelet, Jean-Victor (1788—1867) 鲍赛莱特

Pond, John (1767—1836) 庞德

Pons, Jean Louis (1761—1831) 庞斯

Porta, Giovanni Battista della (1535—1615) 德拉波塔

Poseidonius (公元前135—51) 波赛多尼乌斯

Pouillet, Claude-Servain (1791—1868) 普耶

Pregl, Fritz (1869—1930) 普列格尔

Prévost, Pierre (1751—1839) 普雷沃

Priestley, Joseph (1733—1804) 普利斯特列

Proust, Joseph Louis (1754—1826) 普劳斯特

Psellos, Michael Constantine (1018—1079) 赛洛斯

Ptolemy, Claudius (二世纪) 托勒密

Pullman, George Mortimer (1831—1897) 乔治·普尔曼

Pupin, Michael Idvorsky (1858—1935) 普宾

Pythagoras of Samos (约公元前570—497/6) 和Pythagoreanism 萨摩斯的毕达哥拉斯和毕达哥拉斯主义

Quételet, Lambert Adolphe Jacques (1769—1874) 凯泰莱

Radcliffe, William (1760—1841) 雷德克利夫

Rameau, Jean-Philippe (1683—1764) 拉莫

Ramelli, Augustin (1531—1590) 罗曼利

Ramsay, Sir William (1852—1916) 威廉·拉姆赛爵士

| | |
|---|---|
| Ramsden, Jesse (1735—1800) | 拉姆斯登 |
| Rankine, William John Macquorn (1820—1872) | 兰金 |
| Raoult, Francois Marie (1830—1901) | 劳尔特 |
| Rayleigh, John William Strutt, Baron (1842—1919) | 瑞利 |
| Râzî (852—932) | 拉兹 |
| Réaumur, René Antoine Ferchault de (1683—1757) | 雷奥米尔 |
| Recorde, Robert (约1510—1558) | 理考德 |
| Regiomontanus (1436—1476) | 瑞吉奥蒙塔努斯 |
| Regnault, Henri Victor (1810—1878) | 勒尼奥 |
| Reich, Ferdinand (1799—1833) | 莱欣 |
| Reichenbach, Georg von (1788—1869) | 赖兴巴赫 |
| Reinhold, Erasmus (1511—1553) | 雷霍特 |
| Reis, Philipp (1834—1874) | 赖斯 |
| Rennie, George (1791—1866) | 雷尼 |
| Repsold, Johann Georg (1771—1830) | 雷普佐尔德 |
| Rey, Jean (1583—1645) | 雷伊 |
| Richer, Jean (1630—1696) | 里歇 |
| Richmann, Georg Wilhelm (1711—1753) | 里希曼 |
| Richter, Jeremias Benjamin (1762—1807) | 李希特 |
| Ritter, Johann Wilhelm (1776—1810) | 里特 |
| Robert of Chester (约1150年) | 切斯特的罗伯特 |
| Roberts, Richard (1789—1864) | 罗伯茨 |
| Robinson, John (1778—1843) | 鲁宾逊 |
| Roebuck, John (1718—1794) | 罗伯克 |
| Roget, Peter Mark (1779—1869) | 罗热 |
| Rømer, Ole (1644—1710) | 雷默 |

Rondelet, Jean (1734—1829) 朗德兰特

Roozeboom, Hendrik Willem Bakhuis (1854—1907) 鲁兹布姆

Roscoe, Sir Henry (1833—1915) 罗斯科

Rouelle, Hilary Milanus (1718—1779) 罗耶列

Rowland, Henry Augustus (1848—1901) 罗兰

Rühmkorff, Heinrich Daniel (1803—1877) 鲁姆柯夫

Rumford, Count, 见 Thompson, Benjamin 朗福德

Runge, Carl David Tolmé (1856—1927) 龙格

Rutherfurd, Lewis Morris (1816—1892) 卢瑟福

Sabine, Wallace Clement (1868—1919) 萨拜因

Sacrobosco (卒于1256年) 萨克罗伯斯哥

Salinas, Franciscus (1513—1590) 萨利纳斯

Sargon I 萨贡 (亚述国王)

Saussure, Horace-Bénédict de (1740—1799) 贝内迪克特·德·索絮尔

Saussure, Nicholas Théo de (1767—1845) 尼古拉·德·索絮尔

Sauveur, Joseph (1653—1716) 索弗尔

Savart, Félix (1791—1841) 萨瓦尔特

Savery, Thomas (1650—1715) 萨弗里

Savile, Sir Henry (1549—1622) 沙维尔

Scamozzi, Vincent (1552—1616) 塞莫兹

Scheele, Carl Wilhelm (1742—1786) 舍勒

Scheiner, Christopher (1575—1650) 沙伊纳

Schlick, Arnolt (1460—约1517) 施利克

Schöffer, Peter (1425—1503) 肖弗

Schönfeld, Eduard (1829—1891) 舍恩费尔德

| | |
|---|---|
| Schott, Kaspar (1608—1666) | 绍特 |
| Schröter, Johann Hieronymus (1745—1816) | 施勒特尔 |
| Schützenberger, Paul (1829—1897) | 肖采卜格 |
| Schwabe, Heinrich Samuel (1789—1875) | 施瓦布 |
| Schwanhardt, George (1601—1667) | 西瓦哈特 |
| Schweigger, Johann Salomo Christoph (1779—1857) | 施魏格尔 |
| Secchi, Angelo (1818—1878) | 赛奇 |
| Seebeck, Thomas Johann (1770—1831) | 赛贝克 |
| Séguin, Édouard (1812—1880) | 塞甘 |
| Seidel, Philip Ludwig (1821—1896) | 赛德尔 |
| Sénarmont, Henri Hureau de (1808—1862) | 德·赛纳蒙特 |
| Seneca, Lucius Annaeus (公元前 4—公元65) | 赛涅卡 |
| Senefelder, Alois (1771—1834) | 塞尼菲尔德 |
| Sennacherib | 塞纳赫瑞勃（亚述国王） |
| Sharp, Abraham (1651—1742) | 夏普 |
| Siemens, Ernst Werner von (1816—1892) | 西门子 |
| Siger of Brabant (约1235—1281/4) | 布拉班特的西格 |
| Simplicius (六世纪) | 辛普里丘 |
| Smeaton, John (1724—1792) | 史密通 |
| Snellius, Willebrord (1591—1626) | 斯涅尔 |
| Socrates | 苏格拉底 |
| Soemmering, Samuel Thomas van (1775—1830) | 索姆林 |
| Solvay, Ernest (1838—1922) | 索尔维 |
| Sorby, Henry Clifton (1826—1908) | 索比 |
| Soto, Franciscus (1494—1560) | 索托 |
| Sprague, Frank Julian (1857—1934) | 斯泼拉卡 |

| | |
|---|---|
| Stahl,Georg Ernst (1660—1734) | 施塔尔 |
| Stas,Jean Servais (1813—1891) | 斯塔斯 |
| Stefan,Joseph (1835—1893) | 斯忒藩 |
| Steinheil,Carl August (1801—1870) | 斯坦海尔 |
| Stephanos (八世纪) | 斯特芳诺斯 |
| Stephenson,George (1781—1848) | 史蒂文逊 |
| Stevin,Simon (1548—1620) | 斯台文 |
| Stokes,Sir George Gabriel (1819—1903) | 斯托克斯 |
| Stoney,George Johnson (1826—1911) | 斯通尼 |
| Straton of Lampsacus (卒于公元前270年) | 拉姆普萨卡斯的斯特拉顿 |
| Strutt,Jedediah (1726—1797) | 斯特鲁特 |
| Strutt,John William | J.W.斯特鲁特 |
| Struve,Friedrich Georg Wilhelm (1793—1864) | 斯特鲁维 |
| Sturgeon,William (1783—1850) | 斯杜尔吉 |
| Sturm,Jacob,Carl Franz (1803—1855) | 斯特姆 |
| Sulzer,Johann Georg (1720—1779) | 苏尔泽 |
| Swan,Sir Joseph Wilson (1828—1914) | 斯旺 |
| Swedenborg,Emanuel (1688—1772) | 斯惠登堡 |
| Swineshead,Richard (Suisset) (十四世纪) | 斯温内斯海德 |
| Sydenham,Thomas (1624—1689) | 西德纳姆 |
| Symmer,Robert (卒于1763年) | 西默 |
| Tachenius,Otto (卒于1670年) | 塔钦尼乌斯 |
| Tacticos,Aeneas (约公元前300年) | 塔克梯克斯 |
| Talbot,William Henry Fox (1800—1877) | 泰尔包特 |
| Tartini,Giuseppe (1692—1770) | 他耳提尼 |

Taylor,Brook (1685—1731) 泰勒

Taylor,Frederick Winslow (1856—1915) 泰罗

Telford,Thomas (1757—1834) 泰尔福特

Tennant,Charles (1768—1838) 坦内特

Thābit ibn Qurra (826/7—901) 塔比特·伊本·库拉

Thales of Miletus (约公元前640—546) 米利都的泰勒斯

Thenard,Louis Jacques (1777—1857) 泰纳

Theodoric of Freiberg 见Dietrich

Theophilus (十二世纪) 柴奥菲鲁斯

Thomas Aquinas 见Aquinas

Thompson,Benjamin,Count Rumford (1752—1814) 本杰明·汤姆逊

Thomson,Joseph John (1856—1940) 约翰·汤姆逊

Thomson,Lord Kelvin,William (1824—1907) 威廉·汤姆逊（凯尔文勋爵）

Timocharis (公元前三世纪) 梯莫开里斯

Titius (Tietz),Johann Daniell (1729—1796) 提丢斯

Torricelli,Evangelista (1608—1647) 托里拆利

Town,Ithiel (1784—1844) 汤

Townley,Richard (十八世纪) 汤立

Trembley,Abraham (1700—1784) 特兰布利

Trésaguet,Paul Marie (1716—1796) 特兰沙古特

Trevithick,Richard (1771—1833) 特列维雪克

Troostwijk,Adriaen Paets van (1752—1837) 特鲁斯特维克

Tschirnhausen,Ehrenfried Walter von (1651—1708) 肖哈森

Tudor,Frederick (1783—1864) 杜道尔

Tyndall,John (1820—1893) 丁铎尔

Utzschneider,Joseph von (1763—1840) 乌奇奈德尔

Van Eyck,Huibrecht and Jan 范·伊克
Varignon,Pierre (1654—1722) 瓦里尼翁
Vaucanson,Jacques de (1709—1782) 德·弗卡森
Vegetius,Flavius Renatus (十四世纪) 维吉梯斯
Vermuyden,Sir Cornelius (卒于1665年) 弗姆敦
Vettius Valens (150年) 威兰斯
Vierlingh,Andries (约1507—约1570) 维林
Villanova 见Arnald
Vinci,Leonardo da (1452—1519) 达·芬奇
Vitellio (十三世纪) 威特罗
Vitruvius Pollio,Marcus (约公元前50—26) 维特鲁维斯
Viviani,Vincenzo (1622—1703) 维维阿尼
Vogel,Hermann Carl (1841—1907) 沃格耳
Volta,Count Alessandro (1745—1827) 伏打
Vossius,Isaac (1618—1669) 沃西阿斯

Waage,Peter (1833—1900) 瓦格
Waals,Johannes Diederik van der (1837—1923) 范·德·瓦尔斯
Walker,Sears Cook (1805—1853) 华尔克
Wallis John (1616—1703) 汪利斯
Watson,William (1834—1915) 沃森
Watt,James (1736—1819) 瓦特
Weber,Ernst Heinrich (1795—1878) 恩斯特·韦伯
Weber,Wilhelm Eduard (1804—1891) 威尔海姆·韦伯
Wedgwood,Josiah (1730—1795) 惠奇渥特
Welsbach,Carl Auer von (1858—1929) 威尔士巴赫

| | |
|---|---|
| Welser, Marcus (1558—1614) | 韦尔塞尔 |
| Wenzel, Karl Friedrich (1740—1793) | 温策尔 |
| Westinghouse, George (1846—1914) | 惠斯汀豪斯 |
| Wheatstone, Sir Charles (1802—1875) | 惠斯顿 |
| Whitney, Eli (1765—1825) | 惠特纳 |
| Whittle, Sir Frank (生于1907年) | 惠特尔 |
| Wien, Wilhelm (1864—1928) | 维恩 |
| Wilcke, Johan Carl (1732—1796) | 维尔克 |
| Wilkins, John (1614—1672) | 威尔金斯 |
| Wilkinson, John (1728—1808) | 威尔金森 |
| William of Conches (1080—1145) | 康赫斯的威廉 |
| William of St Cloud (约1275年) | 圣克劳特的威廉 |
| Williams, Charles Hanson Greville (1829—1910) | 威廉斯 |
| Willstätter, Richard (1872—1942) | 维尔斯塔特 |
| Wilson, Alexander | A.威尔逊 |
| Wilson, Benjamin (1721—1788) | B.威尔逊 |
| Winkler, Johann Heinrich | 惠克勒 |
| Wislicenus, Johannes (1835—1902) | 维斯里辛努 |
| Witelo 见Vitellio | |
| Wöhler, Friedrich (1800—1882) | 维勒 |
| Wolff, Christian (1679—1754) | C.沃尔弗 |
| Wollaston, William Hyde (1766—1828) | 武拉斯顿 |
| Worcester, Marquess of | 华塞特的马阔斯 |
| Worthington, Henry Rossiter (1817—1880) | 华兴顿 |
| Wren, Sir Christopher (1632—1723) | 雷恩 |
| Wright, Edward (1568—1615) | 赖特 |
| Wroblewsky, Zygmunt Florenty von (1845—1888) | 冯·沃比莱夫斯基 |

Young, Thomas (1773—1829) 托马斯·杨

Zachaire, Denis 扎恰瑞

Zamboni, Giuseppe (1776—1846) 赞布尼

Zeeman, Pieter (1865—1943) 塞曼

Zeiss, Carl (1816—1888) 蔡斯

Zeno of Elea (约公元前490—430) 爱利亚的芝诺

Zoser (公元前2750年) 棱索尔（埃及国王）

Zosimos of Panopolis (三世纪) 佐西莫斯

Zsigmondy, Richard Adolf (1865—1929) 席格蒙迪

Zucchi, Niccolò (1586—1670) 朱希

［Ｇｅｎｅｒａｌ　Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝科学技术史
作者＝［荷兰］Ｒ．Ｊ．弗伯斯　　Ｅ．Ｊ．狄克斯特霍伊斯
页数＝４２０
ＳＳ号＝１０１８６５０８
出版日期＝１９８５年１０月第１版
出版社＝求实出版社

前言
目录
序言
第一章　起源
第二章　希腊科学——希腊哲学的一个方面
第三章　希腊科学
第四章　希腊和罗马的工程与技术
第五章　占星术和炼金术的兴起
第六章　早期中世纪的科学
第七章　晚期中世纪的科学
第八章　中世纪的技术和工程
第九章　天文学的革新
第十章　十七世纪的物理学（１）伽利略时期
第十一章　十七世纪的物理学（２）笛卡儿时期
第十二章　十七世纪的物理学（３）惠更斯时期
第十三章　从炼金术到化学
第十四章　伊萨克·牛顿
第十五章　数学，科学的侍女
第十六章　技术知识出现于出版物
第十七章　牛顿以后的力学
第十八章　热学
第十九章　声学
第二十章　蒸汽机的成熟
第二十一章　光学的进一步发展
第二十二章　十七世纪的天文学以及其后至十九世纪中叶的天文学史
第二十三章　十八、十九世纪的电磁学
第二十四章　钢和电改变着世界
第二十五章　新化学
第二十六章　近代化学工业的兴起
原书跋
人名索引